Електрични мрежи

Општо

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

Општо за електроенергетските мрежи

Енергетскиот систем се состои од:

- парни котли,
- турбини,
- генератори,
- водови за пренос на топлина,
- водови за пренос на електрична енергија,
- уреди за греење,
- уреди за електрична влеча,
- енергетски трансформатори,
- пумпи,
- вентилатори, итн.

Електроенергетскиот систем (ЕЕС) е електричниот дел од енергетскиот систем. Тој има задача да:

- произведува,
- пренесува и
- распределува, како и да
- преобразува,

исклучително електрична енергија.

Вообичаена е поделбата на ЕЕС според фазите на технолошкиот процес на производството, распределбата и користењето на електричната енергија:

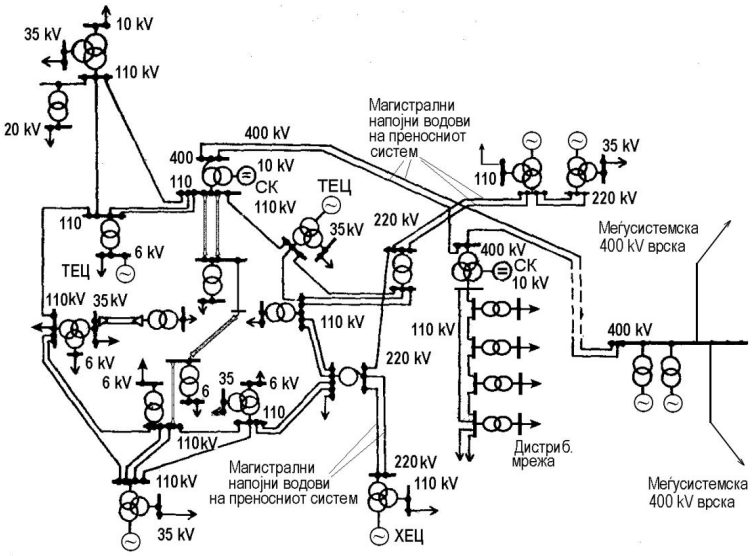
- извори,
- преносна мрежа,
- дистрибутивна мрежа.

Елементи на електричните мрежи

Основни елементи во електричните мрежи

- водови – надземни и кабелски,
- енергетски трансформатори – промена на напонот, трансформаторски станици,
- електрични приемници – преобразување на електричната енергија во други видови енергии,
- потрошувач – група електрични приемници: куќа, стан, зграда, населба, град, фабрика и сл.

Приказ на дел од еден ЕЕС



Кус историјат за формирањето на ЕЕС (1)

- Галвански елементи – Волта (крај на 18 век), електромагнетска индукција Фарадеј (1831), генератор за еднонасочна струја – Грам (1872), електрична централа со еднонасочен напон од 110 V за електрично осветлување на градот – Њујорк (1879).
- Пренос на 1 kW на растојание од 1 km – Фотен, Виена (1873), теоретска можност за пренос на поголеми растојанија со повисок напон – Дебре (1873).
- Сијалица со вжарено влакно – Едисон (1882), нагло пораснале потребите од широка електрифијација. Поради нискиот напон веднаш се јавиле и проблемите со преносот на електричната енергија (големи загуби и падови на напонот).
- И покрај недостатоците со преносот еднонасочната струја сè уште доминирала затоа што немало мотор за наизменична струја за индустријата.

Кус историјат за формирањето на ЕЕС (2)

- Вртливо магнетно поле, асинхрон мотор посигурен и поевтин од еднонасочниот – Тесла (1888). Пресврт во електроенергетиката, примена на наизменичните струи и во индустријата, висок напон, пренос на големи растојанија.
- Пренос на 230 kVA со напон од 15 kV на растојание од 179 km – Лауфен - Франкфурт (1891).
- Прва значајна хидроцентрала со моќност од 3700 kW на реката Нијагара, пренос до Бафало на 37 km – Тесла (1895).
- Пренос со напон од 60 kV во 1906. Пречка за повишување на напонот биле потпорните изолатори со слабата механичка цврстина.
- Изолаторските вериги за во со напон од 110 kV во 1908, 220 kV во 1922. Нова пречка за натамошен пораст на напоните – корона.
- Шупливи спроводници со зголемен дијаметар за вод со напон од 287,5 kV долг 430 km од браната Хувер до Лос Анѓелес (1938).

Кус историјат за формирањето на ЕЕС (3)

- Вод со напон 380 (400) kV со спроводници во сноп, долг скоро 1000 km – Шведска (1952). Веднаш 1956 изграден е 400 kV преносен вод во СССР и во Германија. Во бившата СФРЈ во 1971 година, веднаш потоа е изграден првиот 400 kV надземен вод во Македонија (Скопје 1 – Дуброво – Солун).
- Вод со напон од 500 kV и преносна моќ од 800 MW – од хидроцентрала на Волга до Москва, СССР (1957). Водови со напон од 765 kV за пренос на 5700 MW од хидроцентрали на север до југ на Канада (1965). Највисок напон на вод којшто е во редовен погон е 1150 kV, изграден во СССР во 1987 година. Експерименти и со повисоки напони (1500 kV) но успешно справување со короната има до околу 800 kV.
- Пренос со еднонасочна струја со кабел за 100 kV на растојание од 100 km – остров Готланд, Шведска (1954).

Кус историјат за формирањето на ЕЕС (4)

- Надземен вод со еднонасочен напон $\pm$400 kV долг 470 km, пренос на 720 MW – СССР (1963). Денес постојат надземни водови со напон $\pm$800 kV и со напон $\pm$1000 kV. Оценето е дека за пренос на големи моќности до 500 km е поисплатливо да се користи наизменичнен трифазен систем додека за поголеми должини поповолно е да се применува преносот со еднонасочна струја.

Значење и улога на електричните мрежи

Со електричните мрежи се настојува да се поврзат што е можно повеќе извори и потрошувачи во еден ЕЕС.

- можност за зголемување на електричните моќности на генераторите и електричните централи, помала цена по единица инсталирана моќност,
- значително зголемување на доверливоста на снабдувањето на потрошувачите со електрична енергија;
- зголемување на економичноста во работењето на разните видови електрични централи, при што се настојува да се обезбеди најефикасно искористување на моќностите на хидроцентралите (ХЕЦ) и најекономично работење на термоцентралите (ТЕЦ);
- намалување на неопходната вкупна резервна моќност на централите.

Значење и улога на електричните мрежи

Електроенергетските мрежи треба да се имаат предвид и при решавањето на многу други проблеми како што се:

- составувањето на енергетскиот биланс на земјата;
- определувањето на перспективниот развој на одделните подрачја и искористувањето на суровинските извори (ресурси);
- изборот на локацијата и моќноста на новите електрични централи;
- лоцирањето на големите индустриски објекти;
- поврзувањето на електроенергетските системи.

Во принцип, не е исправно ако при изборот и донесувањето на одлуките во врска со претходните проблеми парцијално се посматра и проучува само една електрична централа, само една електрична мрежа и слично.

Класификација на електричните мрежи

Во зависност од моќноста што се пренесува низ мрежата, растојанието и бројот на потрошувачите мрежата има определена сложеност, конструктивна изведба, карактеристични параметри и слично. Електричните мрежи можат да се класифицираат по низа показатели, меѓу кои основни се:

- конструктивната изведба,
- видот на струјата,
- карактерот на потрошувачите,
- номиналниот напон и
- шемата на поврзување.

Според конструктивната изведба разликуваме:

- надземни мрежи,
- кабелски мрежи и
- внатрешни електрични инсталации.

Класификација на електричните мрежи

- Надземните мрежа се составени од надземни електроенергетски водови изведени најчесто со неизолирани спроводници кои со помош на изолатори се обесени за електричните столбови.
- Кабелските водови, обично се поставуваат во земја, со што водот е побезбеден и посигурен во работењето и од естетски и урбанистички причини тој е значително поприкладен. Но, тие имаат поголема цена, отежната експлоатација и посложена изработка.
- Внатрешните електрични инсталации се изведуваат со изолирани спроводници под малтерот, во ѕидовите и на таваните од просториите.

Класификација на електричните мрежи

Според карактерот на потрошувачите и во зависност од намената разликуваме

- градски мрежи,
- селски мрежи,
- индустриски мрежи,
- регионални мрежи и др.

Покрај оваа поделба мрежите можат да се класифицираат и како

- дистрибутивни мрежи и
- преносни мрежи.

Во наши услови мрежите со напон повисок од 110 kV се преносни, додека мрежите со напон понизок од 110 kV се дистрибутивни. Мрежите со напон 110 kV, зависно од нивната положба и улога во ЕЕС, некаде се преносни, а некаде се дистрибутивни.

Номинални напони – меѓуфазни напони

Секоја мрежа се карактеризира со номинален напон според кој се избираат елементите на нејзината електротехничка опрема. Фактичката вредност на напонот во текот на работата на мрежата може да се разликува од номиналниот напон за мал износ.

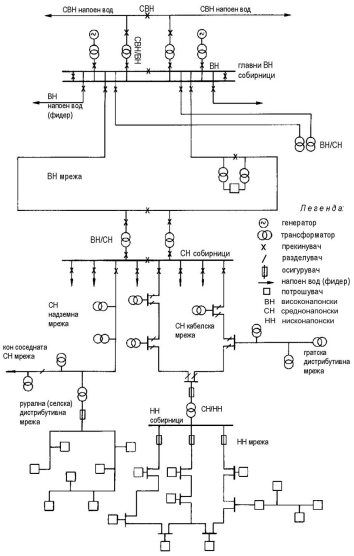
- напоните од 1 до 35 kV се нарекуваат средни напони (СН);
- напоните 110 и 220 kV се нарекуваат високи напони (ВН);
- напоните повисоки од 220 kV се нарекуваат супер високи напони (СВН).

Номинален напон (kV)	Највисок погонски напон (kV)
3	3,6
6	7,2
10	12
20	24
35	38
60	72,5
110	123
220	245
400	420

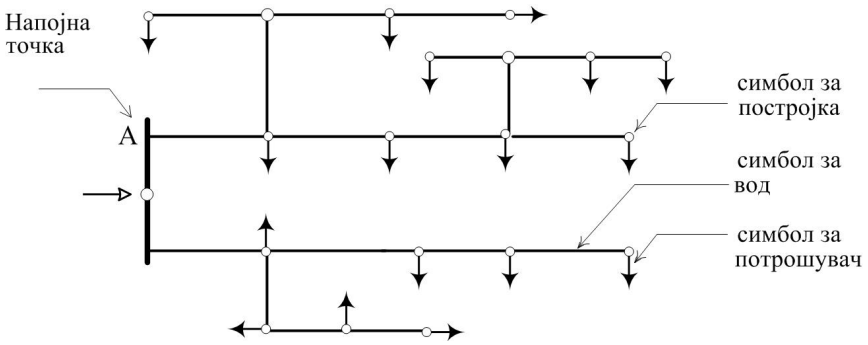
Шема на поврзување

- отворени (радијални),
- отворени со зголемена доверливост,
- јамкасти (затворени) и
- сложено-затворени мрежи.

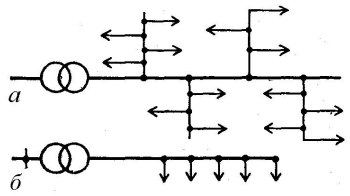
Заемна поврзаност на мрежите

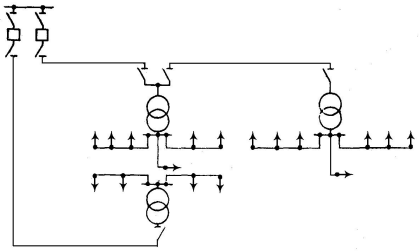


Отворена (радијална) мрежа – принципиелна шема

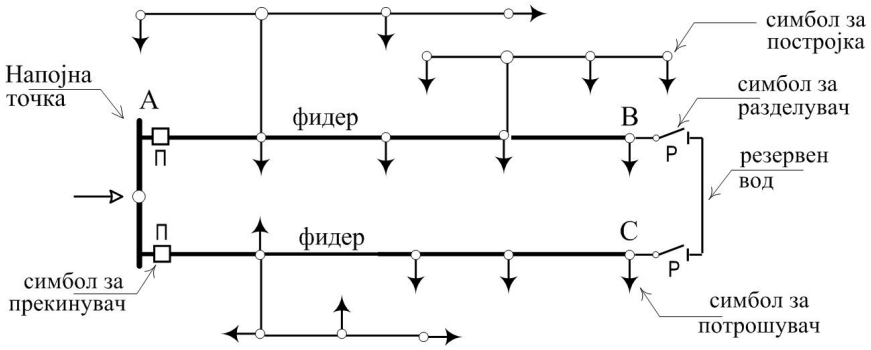


Примери за отворени мрежи

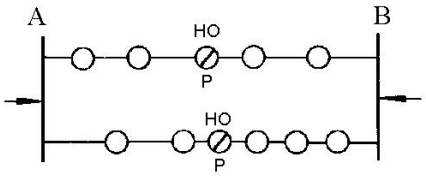




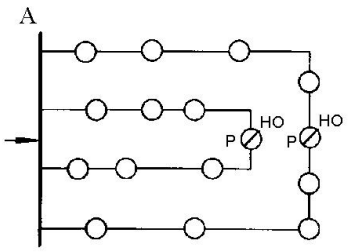
Отворена мрежа со зголемена доверливост



Примери за отворени мрежи со зголемена доверливост

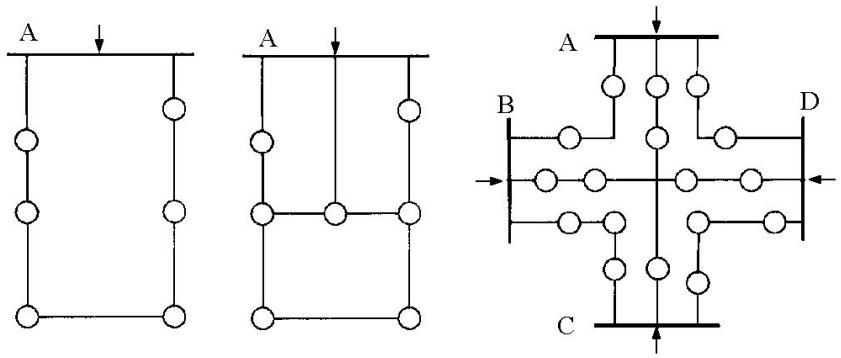


двострано напојувана мрежа



мрежа со отворени прстени

Затворени мрежи



јамкаста сложено затворена сложено затворена

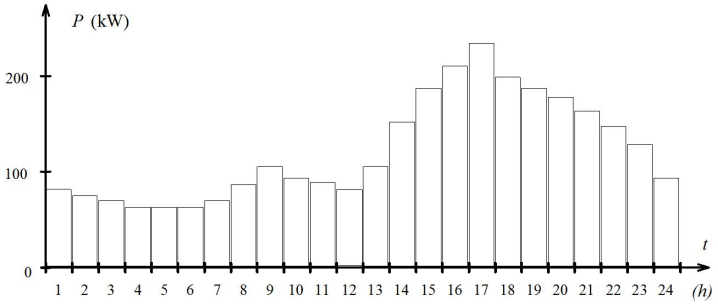
Електрични параметри на електричните мрежи

Кога вршиме анализа на работата на една електрична мрежа разликуваме

- параметри на елементите на мрежата и
  - активните отпорности и спроводности,
  - реактивните отпорности и спроводности на елементите,
  - пресеците на спроводниците од поедините водови,
  - номиналните моќности,
  - коефициентите на трансформација на енергетските трансформатори и друго.
- параметри на режимот на работа на мрежата.
  - фреквенцијата,
  - напоните во поедините јазли,
  - струите и моќностите низ елементите од мрежата,
  - факторот на моќност cosϕ и друго

Режим на работа

Под режим на работа (работен режим) се подразбира нејзината електрична состојба која непрекинато се менува што е последица на промената на оптоварувањата на потрошувачите, вклучувањата и исклучувањата на поедините приемници и промената на вклопната состојба во мрежата.



Дневен дијаграм на оптоварување на потрошувач

При пресметките на мрежите обично се разгледуваат карактеристични режими на нивната работа.

Барања што треба да ги задоволат електричните мрежи

- Доверливо електроснабдување на потрошувачите со електрична енергија која во исто време треба да има и определен квалитет.
- Проблемот со доверливоста во електроснабдувањето е последица на фактот што практично секој елемент на мрежата во текот на својата работа е подложен на дефекти кои предизвикуваат прекини во електроснабдувањето.
- Изградбата и експлоатацијата на електроенергетските мрежи се поврзани со вложување на големи материјални средства. Затоа при нивното проектирање и изградба и при нивната работа треба да се обезбеди што е можно поголема економичност.

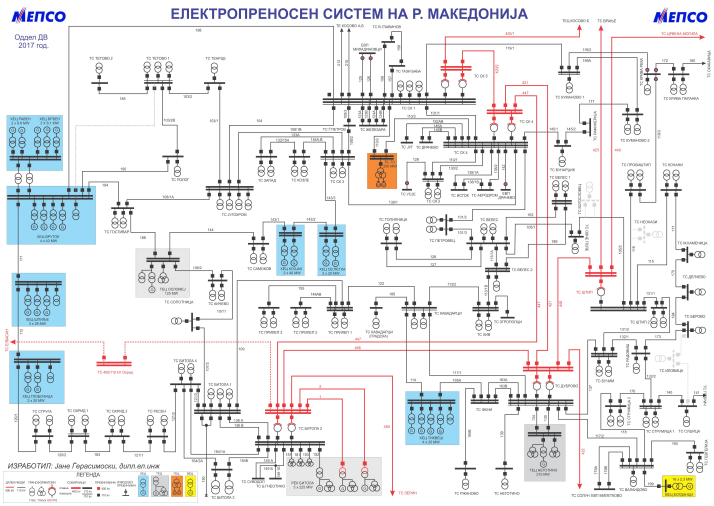
Задача на пресметките на електроенергетските мрежи (1)

- Во фазата на проектирањето и при експлоатација потребно е да се прават пресметки на нејзините режими на работа со цел да се изврши проверка дали струите во елементите и напоните на јазлите се во дозволените граници. Покрај тоа, се проценуваат и загубите на активната и реактивната моќност и енергија.
- Пресметките на се изведуваат повеќе или помалку детално, со различен степен на точност и со земање предвид разни влијателни фактори.
- Во пресметките оптоварувањата на потрошувачите се познати само ориентационо, затоа од резултатите не може да се бара да се одликуваат со голема точност.
- При проектирањето на ЕЕС односно мрежите со разни напонски нивоа, врз основа на претходните пресметки на работните режими, се избираат параметрите на идните водови, трансформатори, електрични централи, како и карактеристиките на уредите за заштита и автоматика.

Задача на пресметките на електроенергетските мрежи (2)

- При пресметките на работните режими на преносната и дистрибутивната мрежа веќе се поточно познати параметрите на нејзините поедини елементи, а во пресметките се влегува со попрецизно определени оптоварувања на потрошувачите.
- Бидејќи ЕЕС треба да работи не само сигурно туку и економично се прават пресметки за оптимизација на режимите за работа на ЕЕС: економски најсоодветната распределба на моќностите меѓу електричните централи, определување на минимални загуби на електричната енергија во мрежата и слично.
- Во денешно време сите пресметки се вршат со помош на компјутери.

ЕЕС на Македонија



ЕЕС на Македонија - термоцентрали

Термоцентрала	Моќност (MW)	Енергија (GWh)	Година	Гориво
Битола 1	233	1.433,3	1982	Јаглен
Битола 2	233	1.403,3	1984	Јаглен
Битола 3	233	1.134,4	1988	Јаглен
Осломеј	125	504,7	1980	Јаглен
Вкупно	824	4.457,7		

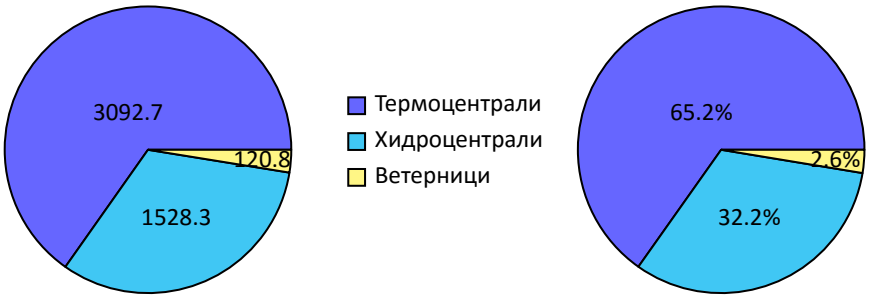
Извор: извештај на ЕЛЕМ, 2012

ЕЕС на Македонија - хидроцентрали

Хидроцентрала	Агрегати	Моќност (MW)	Енергија (GWh)	Година	Тип
Вруток	4	150	206,0	1957/1973	Акумулациона
Равен	3	19,2	23,8	1959/1973	Проточна
Врбен	2	12,8	33,2	1959	Проточна
Шпилје	3	84	239,7	1969	Акумулациона
Глобочица	2	42	169,8	1965	Акумулациона
Тиквеш	4	114	104,8	1968/1981	Акумулациона
Козјак	2	80	97,8	2004	Акумулациона
Света Петка	2	36	12,2	2012	Акумулациона
Вкупно	22	538	887,3		

Извор: извештај на ЕЛЕМ, 2012

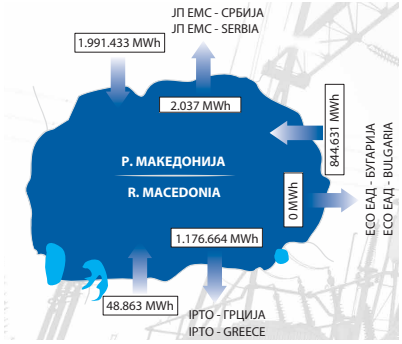
ЕЕС на Македонија, производство (GWh), 2015



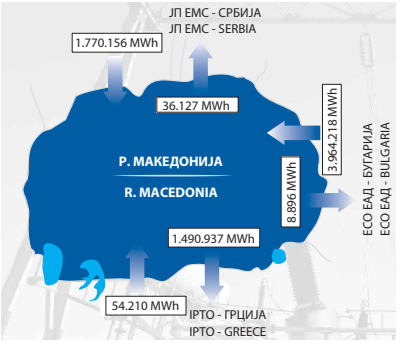
Вкупно 4741.8 GWh

Извор: извештај на ЕЛЕМ, 2015

ЕЕС на Македонија – размена со соседите



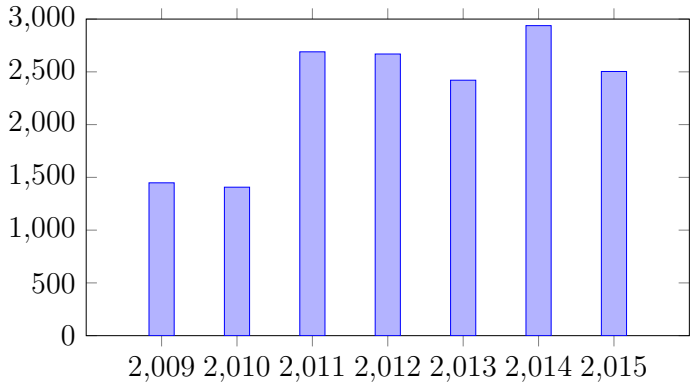
2005



2013

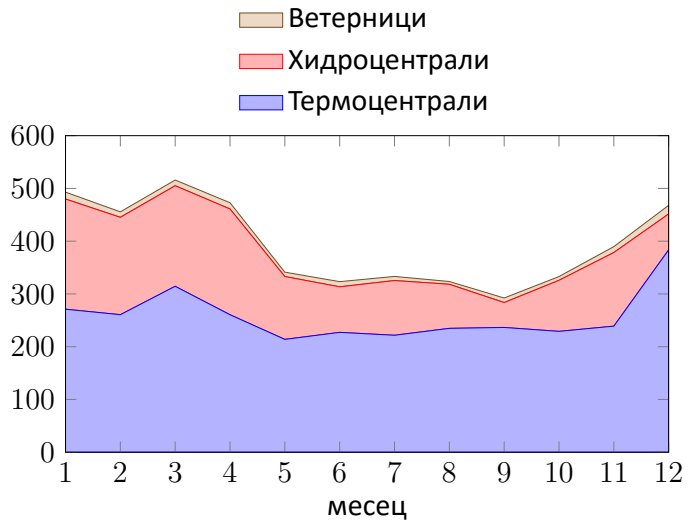
Извор: извештај на МЕПСО, 2014

ЕЕС на Македонија – увоз (GWh)



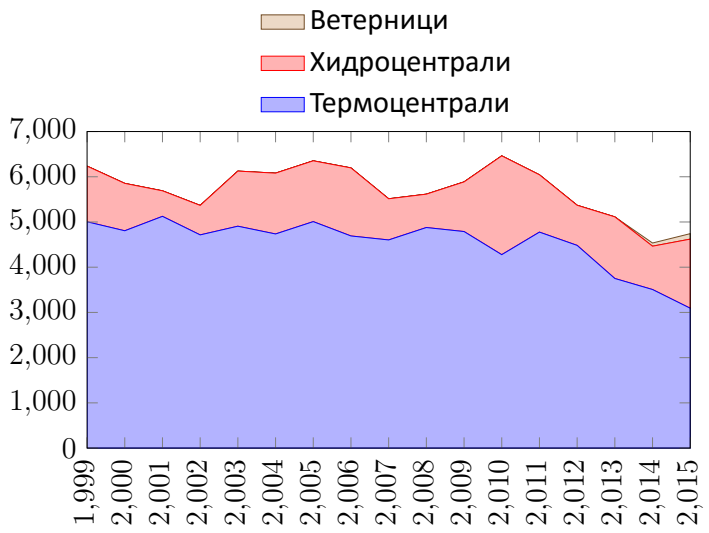
Извор: Студија за прогноза на биланс на енергија и моќност, МЕПСО, 2016

ЕЕС на Македонија, производство (GWh), 2015



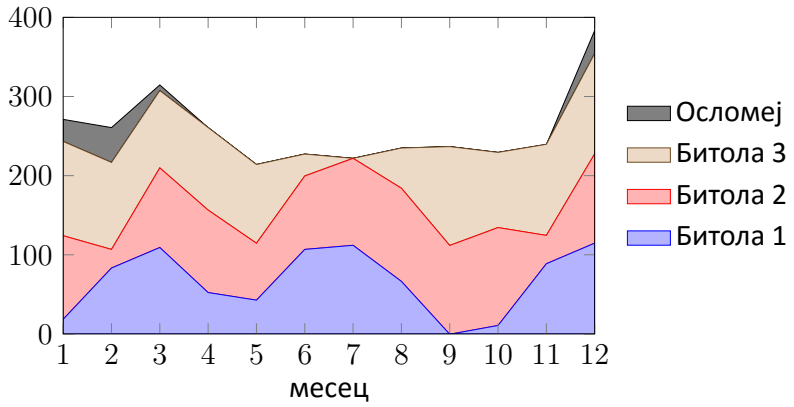
Извор: извештај на ЕЛЕМ, 2015

ЕЕС на Македонија, производство (GWh)



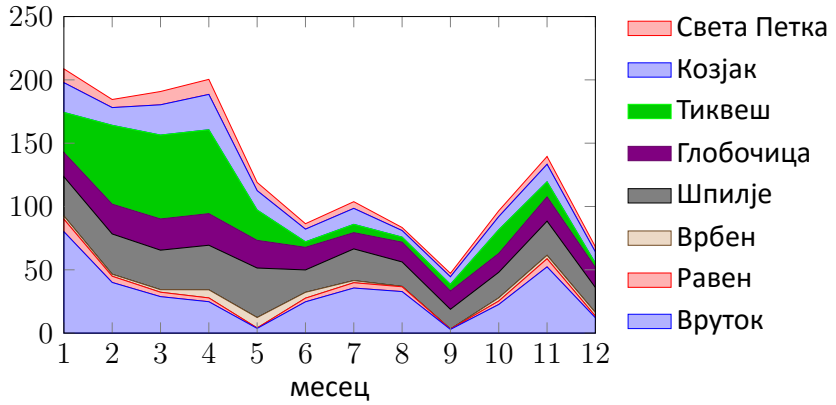
Извор: извештај на ЕЛЕМ, 2015

ЕЕС на Македонија, термоцентрали (GWh), 2015



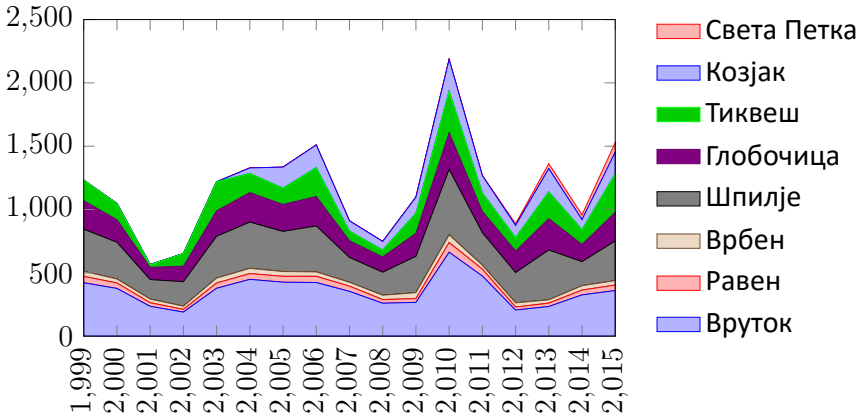
Извор: извештај на ЕЛЕМ, 2015

ЕЕС на Македонија, хидроцентрали (GWh), 2015



Извор: извештај на ЕЛЕМ, 2015

ЕЕС на Македонија, хидроцентрали (GWh)



Извор: извештај на ЕЛЕМ, 2015

Електрични мрежи

Елементи на електроенергетските мрежи и нивна конструктивна изведба

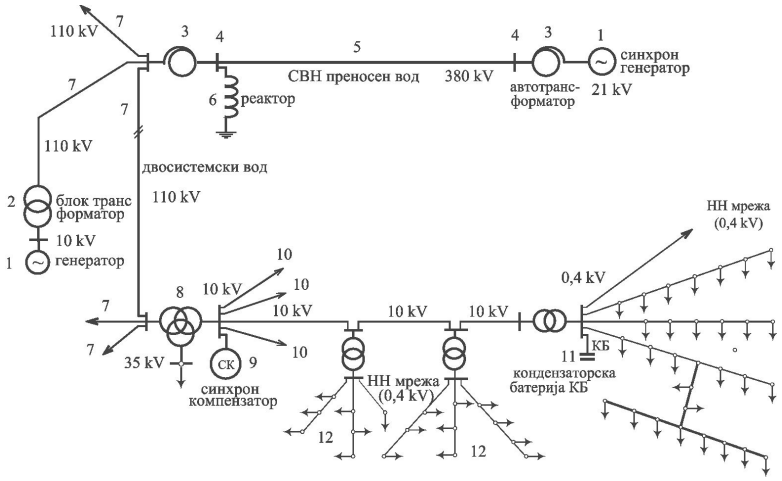
М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

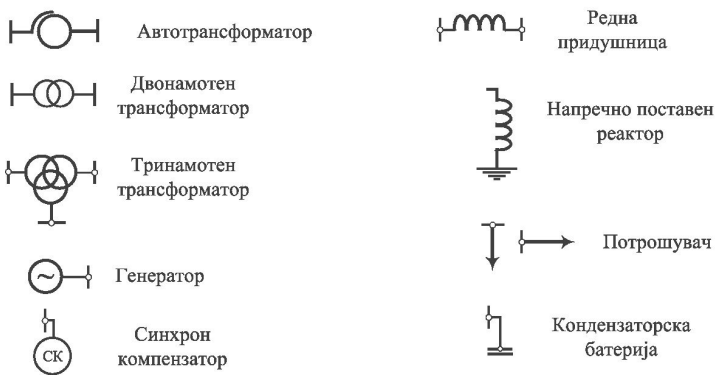
Скопје, 2018

Состав на електроенергетските системи



1) Синхрон генератор; 2) Блок-трансформатор; 3) Автотрансформатор; 4) 380 kV собирници; 5) 380 kV вод; 6) Придушница (реактор); 7) 110 kV вод; 8) Тринамотен трансформатор; 9) Синхрон компензатор (СК); 10) 10 kV дистрибутивен вод; 11) Кондензаторска батерија (КБ); 12) Нисконапонска (НН) дистрибутивна мрежа

Симболи за поважните елементи на ЕЕС



Состав на електроенергетските мрежи

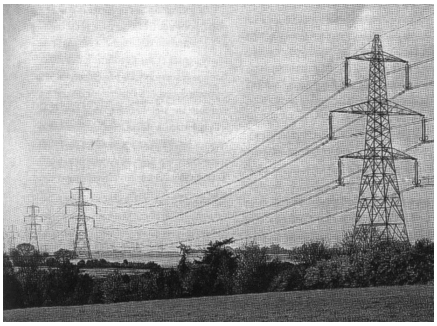
Во составот на електроенергетските мрежи спаѓаат следните елементи:

- надземни водови (далноводи),
- кабелски водови,
- двонамотни и тринамотни енергетски трансформатори,
- кондензаторски батерии,
- синхрони компензатори,
- автотрансформатори,
- кондензаторски батерии и
- придушници (реактори).

Надземни водови

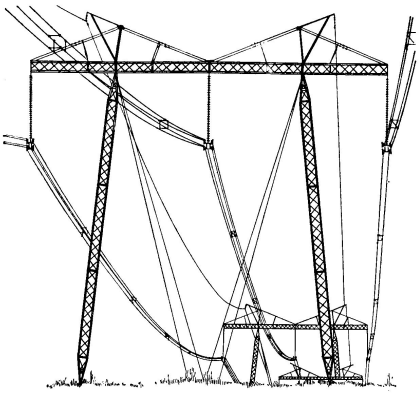
Надземните водови во основа се составени од

- столбови,
- спроводници,
- изолатори,
- соодветен обесувачки (овесен) и споен прибор.

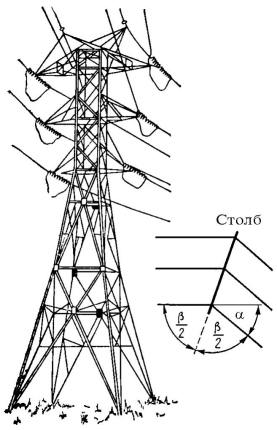


400 kV двосистемски надземен вод

Надземни водови

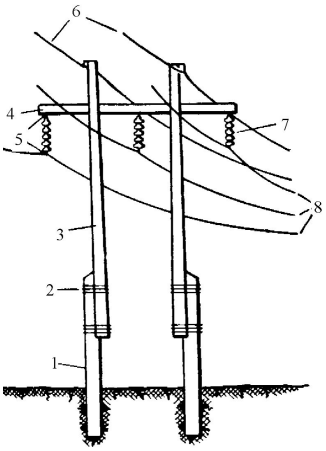


носечки портален столб за напон од 750 kV



двосистемски аголно-затезен столб за напон од 110 kV

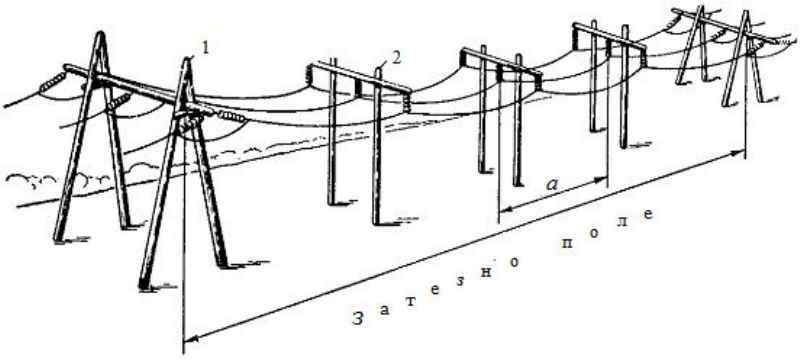
Надземни водови



Дрвен електричен столб од еден 110 kV надземен вод

1) Ногара на столбот; 2) Бандаж (челична жица); 3) Јарбол; 4) Пречка (портал); 5) Арматура за прицврстување на изолаторите; 6) Заштитно (громобранско) јаже; 7) Изолаторски синџир; 8) Фазни спроводници

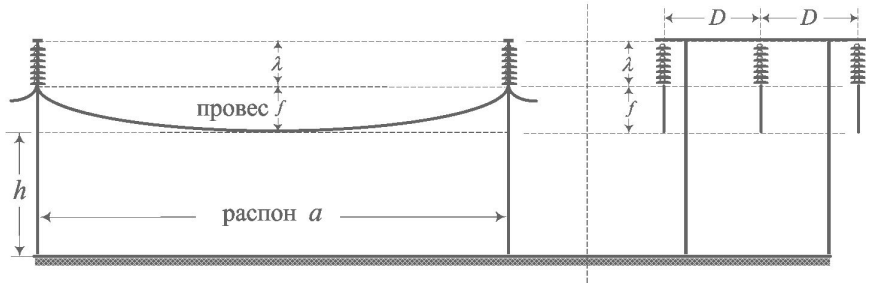
Затезно поле - дел од надземен вод



1) Затезен столб, 2) Носечки столб

Монтажа на 400 kV аголно-затезен столб

Дефиниција на поимите „распон“ и „провес“



Сигурносни височини (m) кај надземните водови

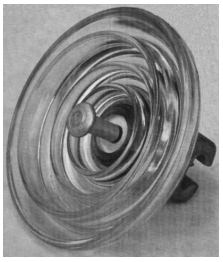
Услови на теренот	НН водови	ВН водови до 110 kV
Непристапни места	4	5
Места пристапни за возила	5	6
Населени места	5	7
Патишта од I до IV ред	6	7
Градски улици	6	7
Згради со запалив покрив	12	12

За водови со номинален напон 220 kV сигурносните височини се за 0,75 m, додека за водовите со номинален напон 380 kV за 2 m поголеми од наведените вредности во последната колона во табелата.

Растојание помеѓу спроводниците (m) кај надземните водови

Номинален напон U_n (kV)	Меѓусебно растојание D (m)
6 – 10	0,8 – 1,5
35	3,0 – 3,5
110	4 – 5
220	6 – 8
380	9 – 11

Капест изолатор – основен елемент на изолаторските синџири

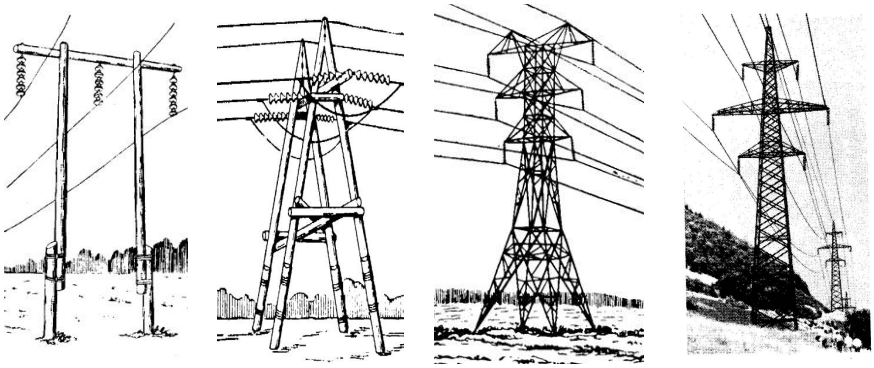


Напон (kV)	Број на елементи
10 и 20	1÷2
35	3÷4
110	6÷7
220	11÷13
400	17÷21

Должината на распоните

Номинален напон $U_n(\mathrm{kV})$	Просечен распон $a(\mathrm{m})$
35	160 – 250
110	250 – 400
220	300 – 400
380	380 – 430

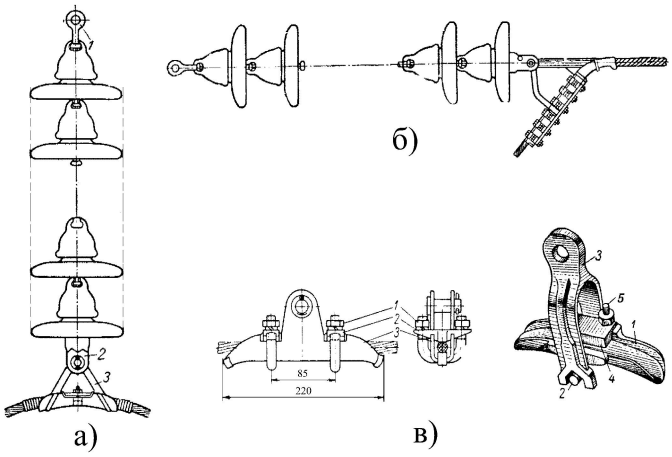
Видови столбови



а) б) в) г)

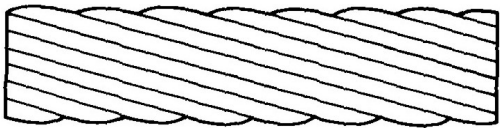
а) Дрвен, носечки
б) Дрвен, аголно-затезен
в) Метален 110 kV, носечки
г) Метален 220 kV, носечки

Изолаторски синџири кај надземните водови

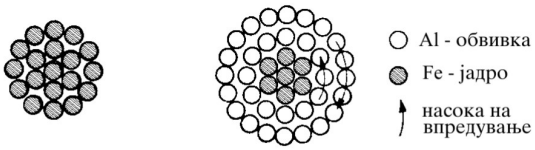


а) Носечки (висечки) синџир; б) Затезен изолаторски синџир; в) Носечка стегалка (арматура) за прицврстување на спроводникот

Спроводници кај надземните водови



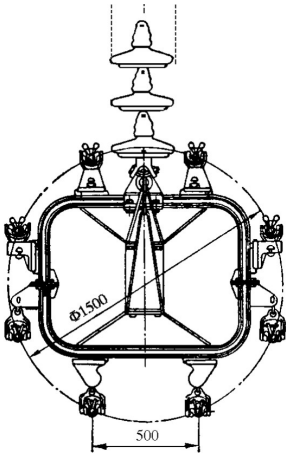
Спроводник во форма на јаже за надземен вод



а) Хомогено јаже б) Комбинирано Al/Fe јаже

Алучел-јаже за надземен вод

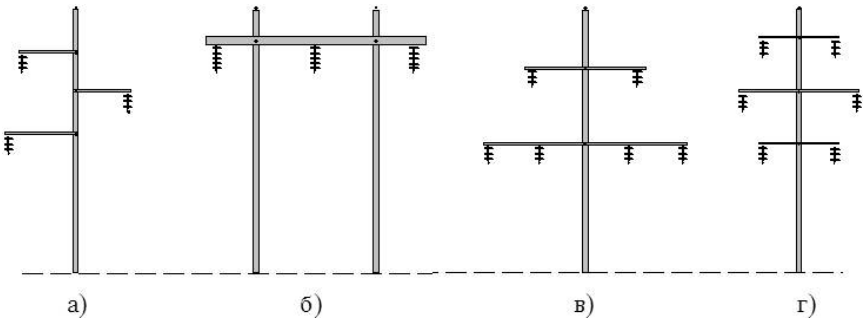
Сноп од спроводници



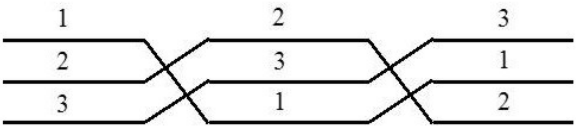
Сноп од спроводници кај еден 1150 kV надземен вод

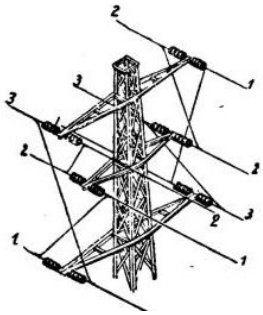
Меѓусебен распоред на фазните спроводници

- распоред во триаголник (а),
- хоризонтален распоред (б),
- распоред на два триаголника (в),
- распоред во вид на бочва (г).

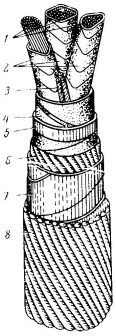


Транспозиција на фазните спроводници

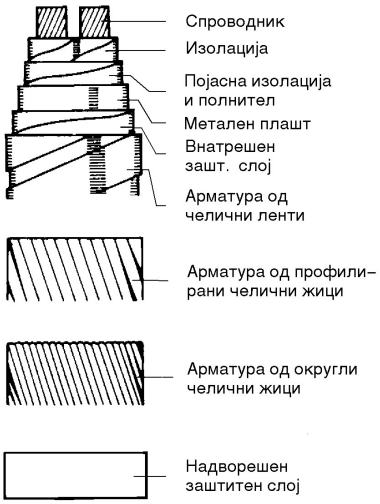




Кабелски водови

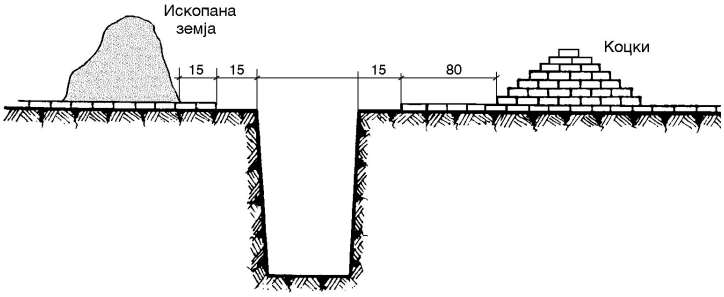


Изглед на трифазен 10 kV класичен појасен кабел со изолација од импрегнирнирана хартија (IP)



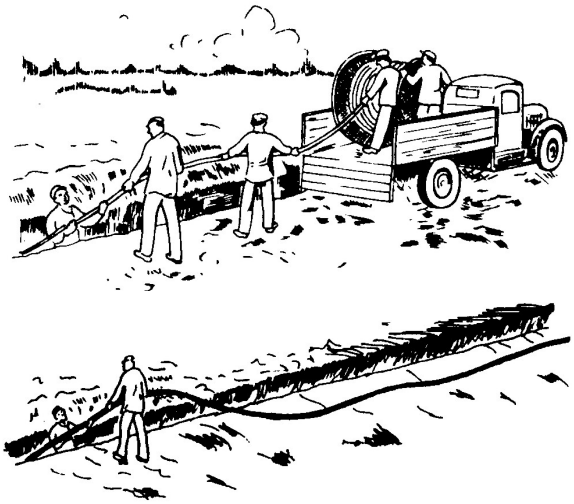
Конструктивни елементи на еден класичен кабел

Поставување на кабли



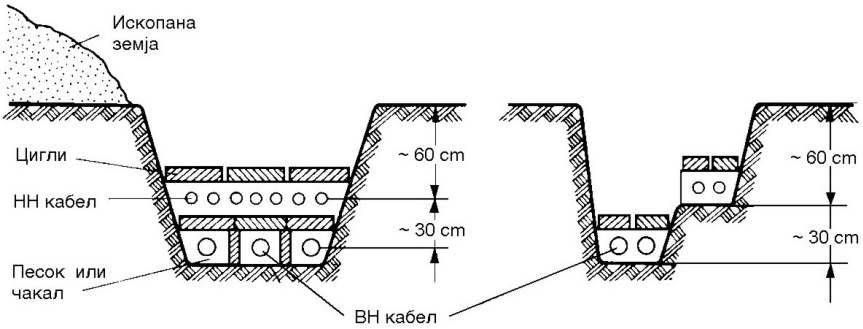
Изглед и димензии на кабелски ров пред полагање на кабелот

Поставување на кабли

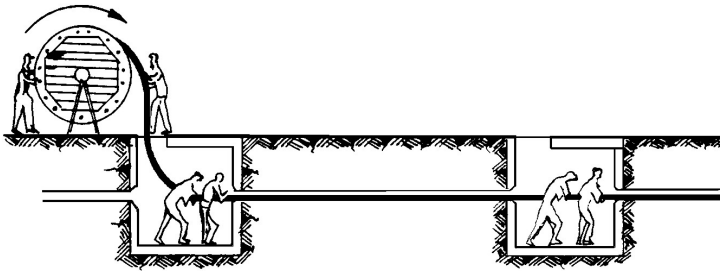


Рачно полагање на енергетски кабел во кабелски ров

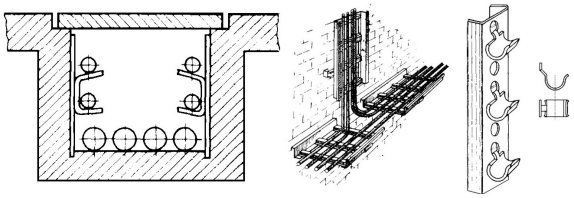
Поголем број кабли поставени во кабелски ров



Полагање на кабли

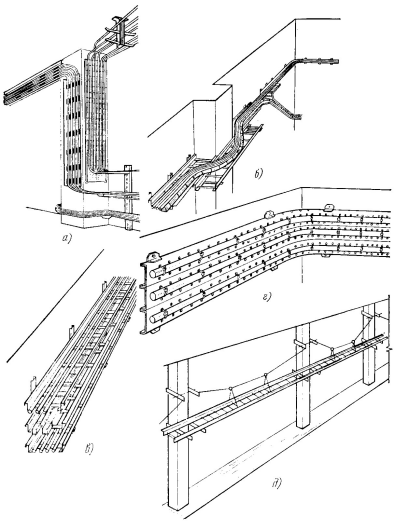


Кабелска канализација



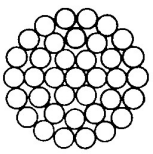
Кабли поставени во кабелски канал (лево); водење на кабли на кабелски регали (средина); специјална конструкција за водење на кабли по ѕид (десно)

Различни начини на водење на кабли поставени во воздух

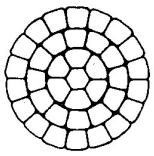


а) на ѕид;
б) на кабелски решетки;
в) на кабелски регали;
г) вертикално на ѕид;
д) на специјални контрукции

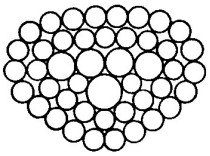
Облици на спроводниците



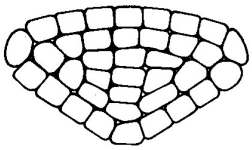
Округол повеќежичен



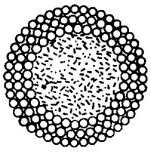
Округол компактиран



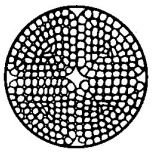
Секторски повеќежичен



Секторски компактиран

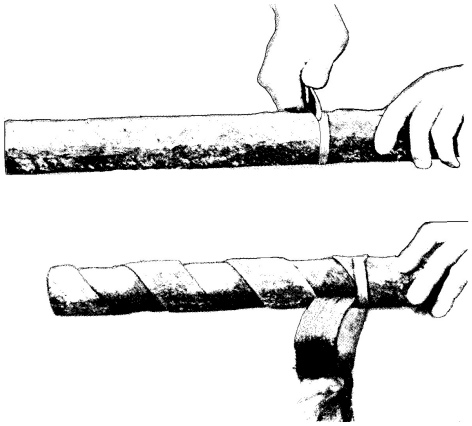


Шуплив повеќежичен

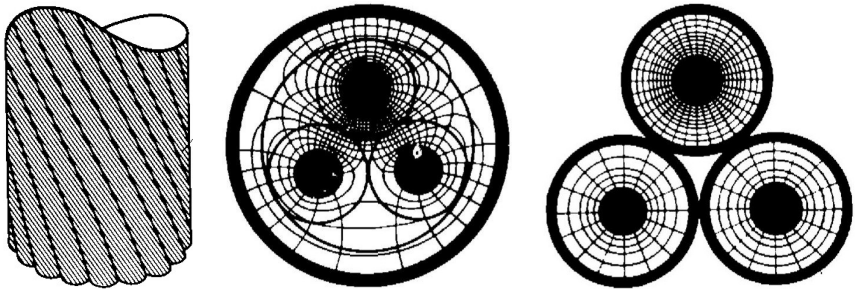


Компактиран сегментен

Метални ленти како механичка заштита на кабелот



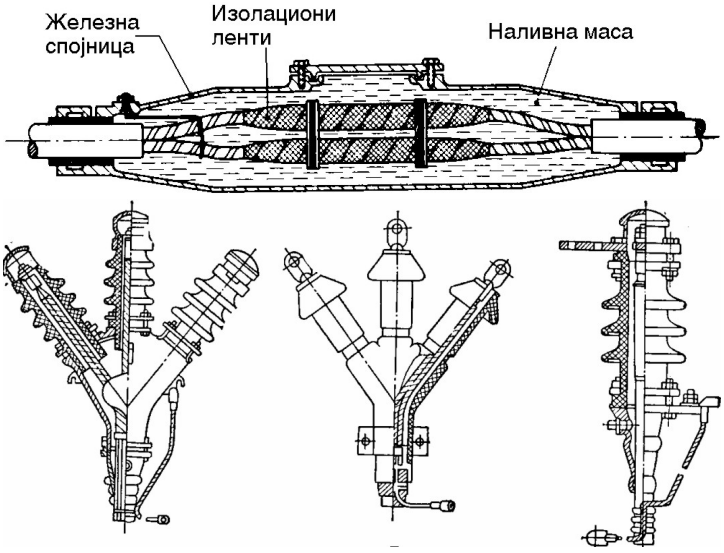
Електрично поле во трифазен кабел



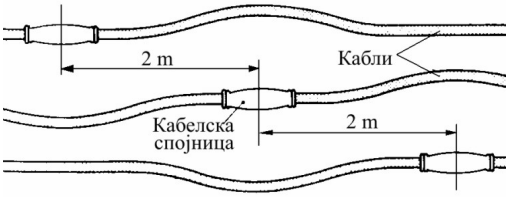
а) б) в)

а) Изглед на површината на спроводникот
б) Поле без екранирање на жилите (појасен кабел)
в) Поле со екранирање на жилите (заштитен, Н-кабел)

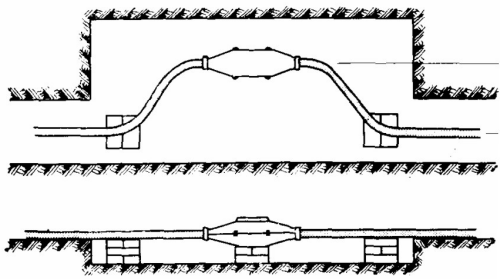
Кабелски спојници и завршници



Спојување кабли



Едножилни кабли



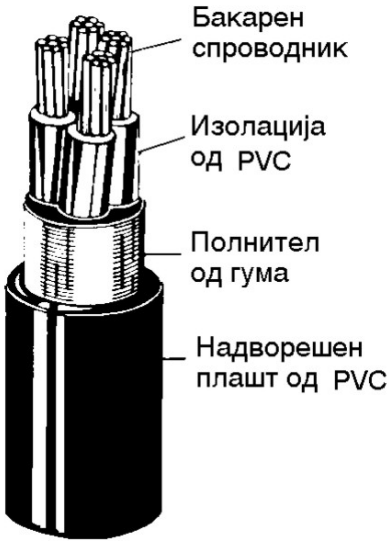
Трижилни кабли

Кабел со изолација од импрегнирана хартија (IP)

за напон од 1 kV

за напон од 35 kV

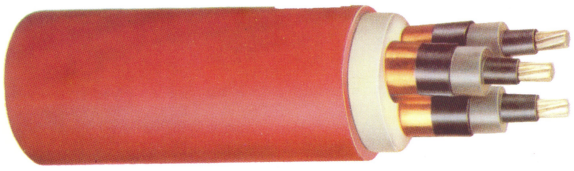
Кабел со изолација од поливинилхлорид (PVC)



за напон од 1 kV

за напон од 10 kV

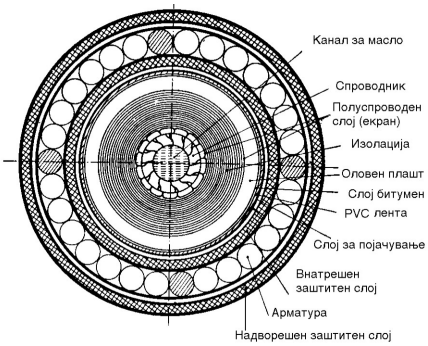
Кабли со изолација од вмрежен полиетилен (XLPE)



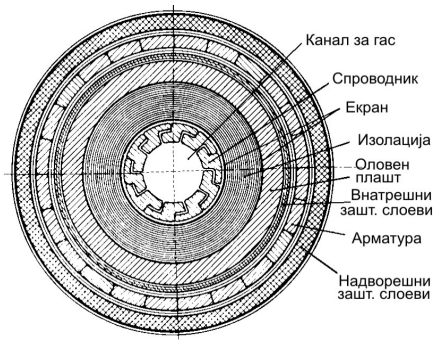
за напон до 10 kV

за напон од 20 kV

Високонапонски кабли со масло и гас под притисок

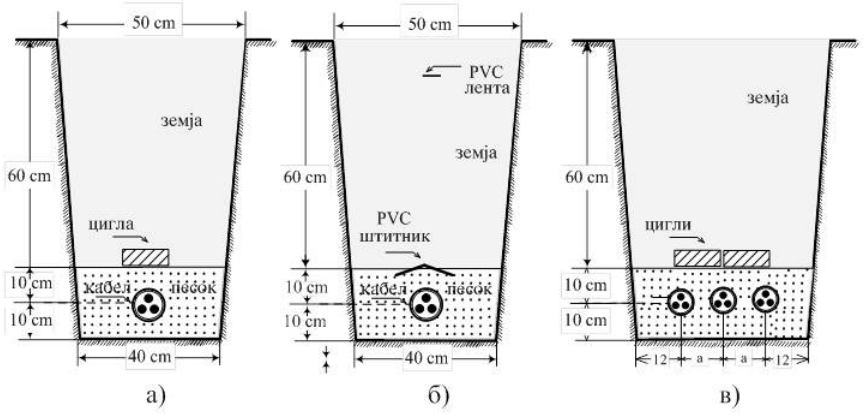


со масло под среден притисок од 0,3 MPa



со гас под висок притисок од 1,5 MPa

Начини на полагање на каблите во земја



Трансформатори и автотрансформатори

Трифазен дистрибутивен трансформатор СН/НН

Трансфор. со моќност од 50 kVA и 8000 kVA

Основни информации за трансформатори

- Трифазните трансформатори можат да бидат двонамотни (пр. 110/10) и тринамотни (пр. 110/35/10).
- Во мрежите со номинален напон над 110 kV широка примена наоѓаат автотрансформаторите. Имаат помали димензии и цена и помали загуби на моќност. Можат да се користат само во мрежи со директно заземјена неутрална точка.
- Трансформаторите 35/10, 10/0,4, 20/0,4 и 35/0,4 се со релативно мали номинални моќности (од 100 kVA до 4000 kVA) и имаат можност за регулација во безнапонска состојба пр. ($10 \pm 5 \times 2,5\%$)/0,4 kV/kV.
- Трансформаторите ВН/ВН и ВН/СН се со значително поголеми номинални моќности (од 20 до 300 MVA) и по правило се изведуваат со можност за регулација под товар. На пр. ($110 \pm 10 \times 1,25\%$)/10,5 kV/kV со моќност од 20 MVA или ($400 \pm 2 \times 2,5\%$)/115 kV/kV си моќност од 300 MVA.

Уреди за компензација

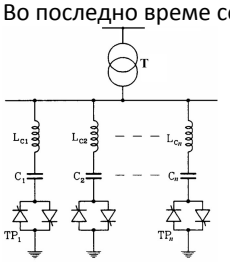
Уредите за компензација на реактивната моќност што ја бараат потрошувачите и елементите од мрежата

- синхроните компензатори (СК);
- синхроните мотори (СМ);
- напречно вклучените кондензаторски батерии (КБ).

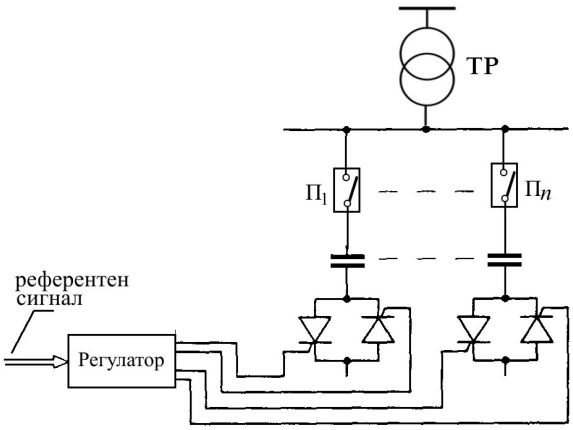
Уредите за компензација на реактивните параметри на водовите

- сериски вклучените кондензаторски батерии;
- напречно вклучените реактори (придушници).

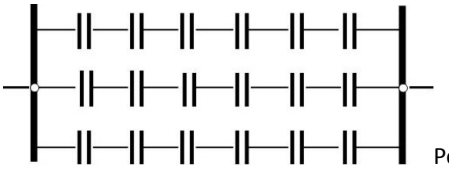
Во последно време се применуваат кондензатори напојувани преку тиристори



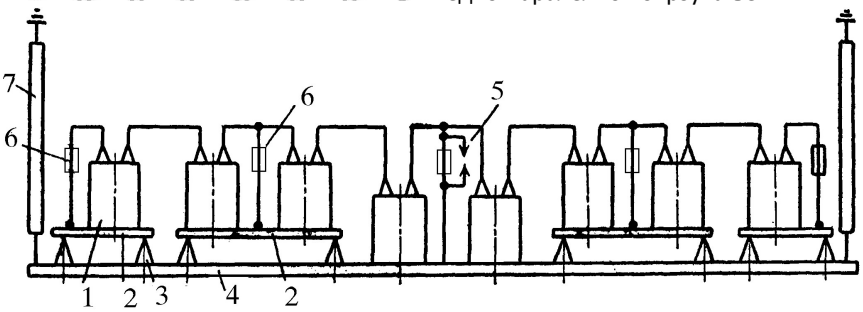
Статички компензатор



Формирање на кондензаторска батерија



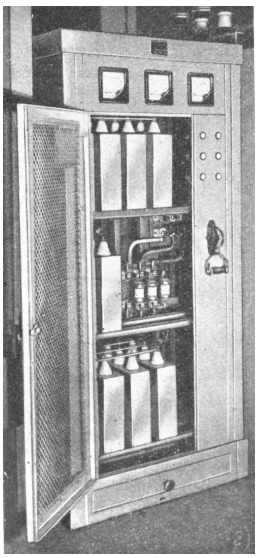
Редно-паралелно поврзување

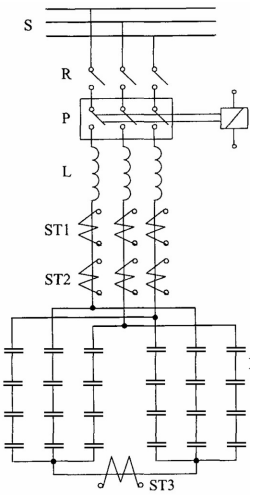


Редна кондензаторска батерија

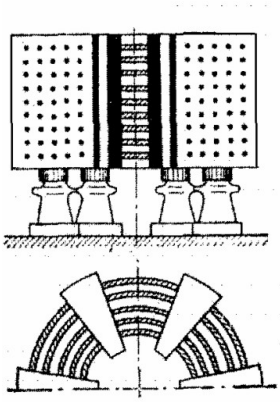
1) Кондензаторска единица од 50 kvar, 2) Платформа, 3) Потпорен изолатор, 4) Главна изолациона платформа, 5) Искриште, 6) Осигурувач, 7) Изолаторски синџир кој ја носи изолационата платформа

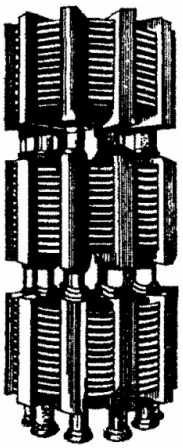
Кондензаторска батерија за низок напон



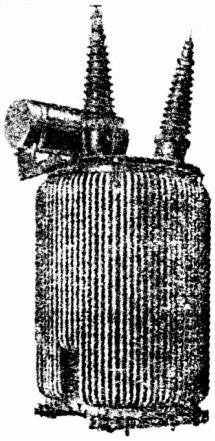


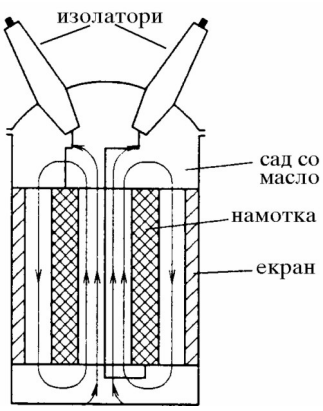
Бетонска придушница за намалување на струите на куси врски



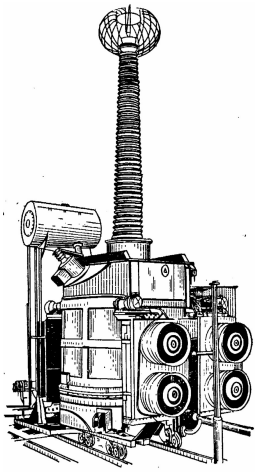


Маслена придушница за 110 kV за намалување на струите на куси врски

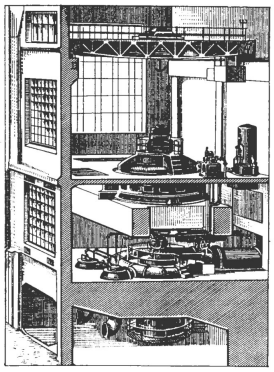




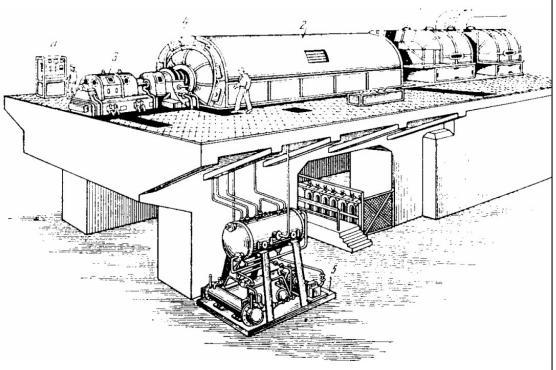
Реактор за компензација на капацитивноста на еден 750 kV вод



Изглед на генератори



хидрогенетарор



турбогенератор

Електрични мрежи

Товари во електричните мрежи – конзум

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

Општо (1)

- Моќноста што се пренесува преку електричните мрежи претставува главен параметар за димензионирање на пресеците на водовите, моќностите на енергетските трансформатори како и карактеристиките на заштитните, регулациски и компензациски уреди.
- Потрошувачите претставуваат сумарен одзив на голем број разновидни електрични приемници (уреди) кои може да се групираат на различни начини.
  - електрично осветление,
  - електромоторни погони,
  - уреди за производство на топлинска енергија,
  - уреди за разладување,
  - уреди за разни електронски кола,
  - други уреди за различна намена.

Општо (2)

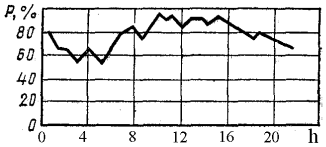
- Од аспект на администрирање со системот приемниците може да се групираат во карактеристични целини
  - домаќинства,
  - административен сектор,
  - индустрија,
  - сообраќај,
  - земјоделие (заедно со прехрамбена индустрија).
- Побарувачката на конзумот не е константна и таа се менува како во текот на денот така и во текот на годината (промена на годишните времиња). За потребите на анализата на ЕЕС можно е да се идентификуваат поголем број карактеристични работни режими
  - Режим на максималното оптоварување
  - Режим на минималното оптоварување

Општо (3)

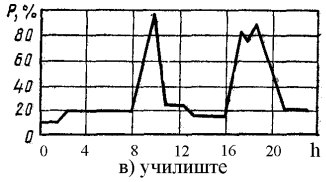
- Режим на економично оптоварување (работа со минимум трошоци)
- Режим на пренесување на природна моќност
- Режим на номинално оптоварување на некои елементи од ЕЕС
- Режим на празен од на некој елементи или пак на делови од системот

Дијаграм на оптоварување

а) индустрија за прецизна механика

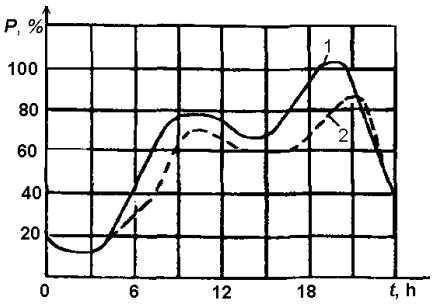


б) индустрија за производство на млеко



в) училиште

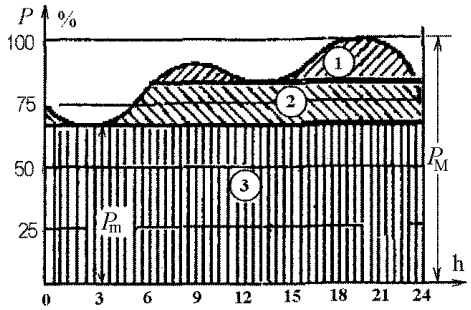
Дијаграм на оптоварување



1) просечен зимски ден, 2) просечен летен ден

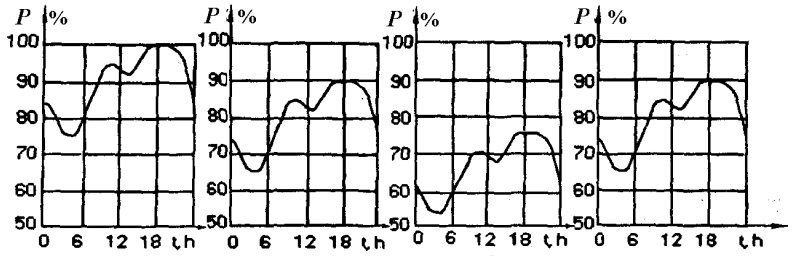
Сумарен дневен дијаграм на оптоварување на ЕЕС

Збирот на дневните дијаграми на оптоварување на сите потрошувачи го формира сумарниот дневен дијаграм на оптоварување на ЕЕС.



Дијаграмот е поделен на три зони: 1) вршна, 2) средна и 3) основна зона.

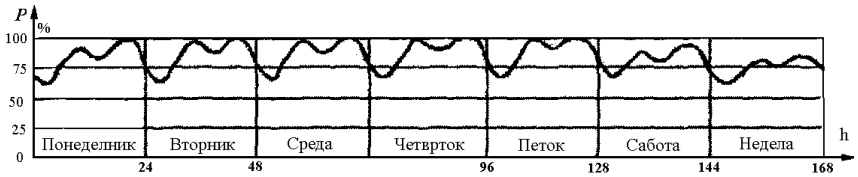
Сезонска промена на дневниот дијаграм



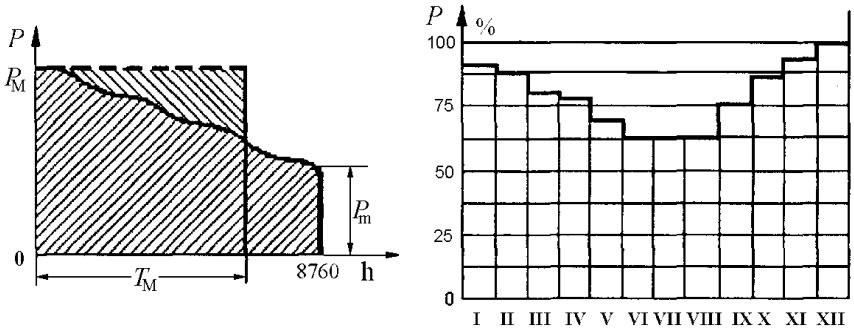
а) зимски б) пролетен в) летен г) есенски

Упросечени дневни дијаграми за работен ден во еден ЕЕС

Неделен дијаграм на оптоварување



Годишен дијаграм на оптоварување



подреден годишен дијаграм (лево) и годишен дијаграм на максималните месечни товари (десно)

Основни параметри на дијаграмите на оптоварување (1)

- Максимално оптоварување P_{M}
- Минимално оптоварување P_{m}
- Средно оптоварување $P_{\text{ср.}}$

$$W = \int_0^T P(t) \cdot dt,$$

$$P_{\text{ср.}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T P(t) \cdot dt = \frac{W}{T}.$$

Основни параметри на дијаграмите на оптоварување (2)

- Употребното време (време за коешто потрошувачот работејќи цело време со својата максимална моќност ќе го преземе истото количество енергија како и при реалниот дијаграм на оптоварување)

$$T_{\mathrm{M}} = \frac{W}{P_{\mathrm{M}}}$$

- Фактор на оптоварување (односот помеѓу средното и максималното оптоварување, мерка за степенот на рамномерност на оптоварувањето)

$$m = \frac{P_{\text{ср.}}}{P_{\mathrm{M}}} = \frac{W}{P_{\mathrm{M}} \cdot T}$$

- Фактор на вршност (однос помеѓу минималното и максималното оптоварување)

$$m_{\text{врв.}} = \frac{P_{\mathrm{m}}}{P_{\mathrm{M}}}.$$

Пример 1

Во табелата се дадени процентуалните дневни дијаграми на оптоварување на активна моќност во нормализиран облик на една станбена зграда и на една градска четврт чијшто конзум се состои од потрошувачи кои спаѓаат во категориите потрошувачи домаќинства (дом.) и комерција (ком.) – респективно. Наедно овие два потрошувача се доминантен конзум на една дистрибутивна трансформаторска станица 10/0,4 kV/kV. Според сметките за преземената електрична енергија просечните дневни потреби од енергија за конзумот што припаѓа на категоријата домаќнинства изнесува $W_{\text{дн.дом.}}$ = 1075 kWh/дневно додека за категоријата комерцвија таа изнесува $W_{\text{дн.ком.}}$ = 1910 kWh/дневно.
Да се нацртаат дневните дијаграми на активното оптоварување на обете категории потрошувачи, изразени во апсолутни вредности (kW), како и сумарниот дневен дијаграм на активното оптоварување. Колкав е сумарниот врв $P_{\text{М,сум}}$, а колкав факторот на едновременост на врвниот товар k ?

Пример 1

t (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
дом.	25	22	20	17	18	18	19	33	39	66	74	100
ком.	20	20	22	27	22	19	23	80	80	45	90	100

t (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
дом.	90	78	33	36	35	42	60	80	70	42	29	29
ком.	100	95	89	67	34	75	100	83	43	15	13	11

Привремено нека претпоставиме дека е $P_{\text{М,дом.}}$ = 1 kW

$$W_{\text{1,дн.дом.}} = 1 \cdot \Sigma p_i \cdot \Delta t_i = 0,25 + 0,22 + 0,20 + 0,17 + 0,18 + \ldots$$
$$+ 0,42 + 0,29 + 0,29 = 10,75\,\text{kWh}$$

Тоа е за $\xi_{\text{дом.}} = W_{\text{дн.дом.}} / W_{\text{1,дн.дом.}} = 1075/10,75 = 100$ пати помало од дневно преземеното количество енергија што му се испорачува на потрошувачот, а тоа значи дека неговата максимална моќност ќе биде
$P_{\text{М,дом.}} = \xi_{\text{дом.}} \cdot 1\,\text{kW} = 100\,\text{kW}$

Пример 1

$$W_{\text{1,дн.ком.}} = 1 \cdot \Sigma p_i \cdot \Delta t_i = 0,20 + 0,20 + 0,22 + 0,27 + \ldots$$
$$+ 0,15 + 0,13 + 0,11 = 12,73\,\text{kWh}$$

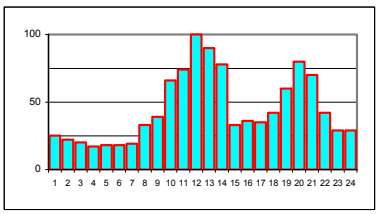
$\xi_{\text{ком.}} = W_{\text{дн.ком.}} / W_{\text{1,дн.ком.}} = 1910/12,73 = 150$
од каде што следи: $P_{\text{М,ком.}} = \xi_{\text{ком.}} \cdot 1\,\text{kW} = 150\,\text{kW}$.

Дневни дијаграми на оптоварување (kW)

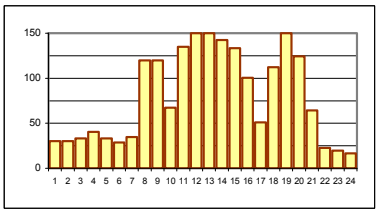
t (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
дом.	25	22	20	17	18	18	19	33	39	66	74	100
ком.	30	30	33	40.5	33	28.5	34.5	120	120	67.5	135	150
сум.	55	52	53	57.5	51	46.5	54.5	153	159	134	209	250

t (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
дом.	90	78	33	36	35	42	60	80	70	42	29	29
ком.	150	142.5	134.5	100.5	51	112.5	150	124.5	64.5	22.5	19.5	16.5
сум.	240	221	167	137	86	155	210	205	135	64.5	48.5	45.5

Пример 1

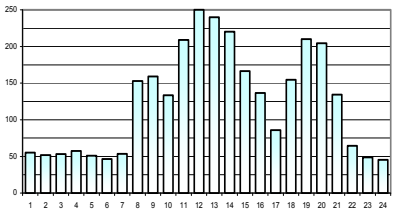


Дневен дијаграм на категоријата „домаќинство“



Дневен дијаграм на категоријата „комерција“

Пример 1



Сумарен дневен дијаграм на обата потрошувача

Факторот на едновременост на врвните товари k_e се дефинира како однос на сумарниот врвен товар $P_{\text{М,сумарно}}$, отчитан од сумарниот дијаграм и збирот на врвните товари на секој потрошувач одделно. Според тоа ќе имаме:

$$k_e = \frac{P_{\text{М,сумарно}}}{P_{\text{М,дом.}} + P_{\text{М,ком.}}} = \frac{250}{100 + 150} = 1$$

Во овој случај дошло до совпаѓање на времињата кога се постигнува максимумот кај обата потрошувача па затоа коефициентот $k_e = 1$. Но, во општ случај, тоа не е така па најчесто овој коефициент е помал од единица.

Пример 2

Подредениот годишен дијаграм на оптоварување на еден потрошувач аналитички може, приближно, да се опише на следните два начина

а) со кривата $P(t) = P_{\text{M}}(1 - 0,6t/T)$;

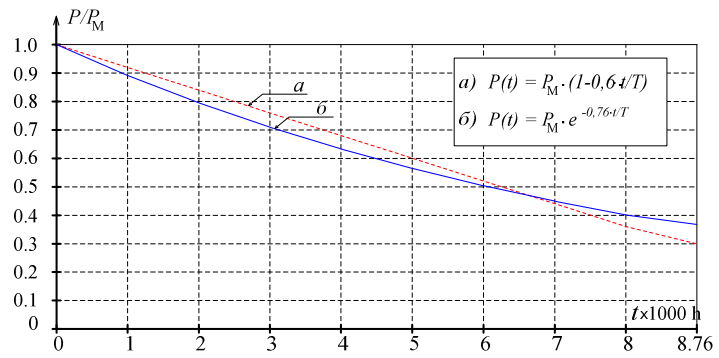
б) со кривата $P(t) = P_{\text{M}}\, e^{-0,76t/T}, \quad T = 8760\ \text{h}.$

За двата наведени случаја да се определат следните параметри:

1. Вкупната преземена електрична енергија во текот на годината W;
2. Времето на максимална моќност P_{M};
3. Времето на загуби τ ;
4. Средногодишната моќност на потрошувачот $P_{\text{ср.}}$ и факторот на товарот $m = P_{\text{ср.}}/P_{\text{M}}$;
5. Факторот на загуби $\theta = \tau/T$;

Познато е дека потрошувачот работи преку целата година со константен фактор на моќност $\cos\varphi = 0,9$.

Пример 2



Пример 2

1. Вкупна преземена енергија

$$W_{(а)} = \int_0^T P_{\mathrm{M}} \cdot (1 - 0,6 \cdot t/T) \cdot dt = P_{\mathrm{M}} \cdot (T - 0,3 \cdot T) = 0,7 \cdot P_M \cdot T,$$

$$W_{(б)} = \int_0^T P_{\mathrm{M}} \cdot e^{-0,76 \cdot t/T} \cdot dt = \frac{P_{\mathrm{M}} \cdot T}{0,76} \cdot (1 - e^{-0,76}) \approx 0,7 \cdot P_{\mathrm{M}} \cdot T.$$

2. Време на максимална моќност

$$T_{\mathrm{M}} = \frac{W}{P_{\mathrm{M}}} = \frac{0,7 \cdot P_{\mathrm{M}} \cdot T}{P_{\mathrm{M}}} = 0,7 \cdot T = 0,7 \cdot 8760 = 6132 \text{ h}.$$

Пример 2

3. Време на загуби τ

Времето на загуби τ се дефинира со помош на изразот (8.16) даден во главата 8

$$\tau = \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_M^2} \cdot dt = \int_0^T \left[\frac{P(t)/\cos\varphi}{P_M/\cos\varphi_M} \right]^2 \cdot dt$$

случај а)

$$P(t) = P_{\mathrm{M}} \cdot (1 - 0,6 \cdot t/T); \quad \cos\varphi = \cos\varphi_{\mathrm{M}} = \text{const}.$$

$$\tau_{а} = \int_0^T \frac{P_{\mathrm{M}}^2 \cdot (1 - 0,6 \cdot t/T)^2}{P_{\mathrm{M}}^2} \cdot dt = 0,52 \cdot T = 4555 \text{ h}.$$

случај б)

$$P^2(t) = P_{\mathrm{M}}^2 \cdot e^{-2 \cdot 0,76 \cdot t/T}; \quad \cos\varphi = \cos\varphi_{\mathrm{M}} = \text{const}.$$

$$\tau_{б} = \int_0^T \frac{P_{\mathrm{M}}^2 \cdot e^{-1,52 \cdot t/T}}{P_{\mathrm{M}}^2} \cdot dt = \frac{T}{1,52} \cdot (1 - e^{-1,52}) = 0,514 \cdot T = 4503 \text{ h}.$$

Пример 2

4. Средна годишна моќност

$$P_{\text{ср.}}\,T = P_{\mathrm{M}}\,T_{\mathrm{M}} = W,$$
$$P_{\text{ср.(а)}} = P_{\text{ср.(б)}} = W/T = 0,7 \cdot P_{\mathrm{M}}.$$

$$m = P_{\text{ср.}}/P_{\text{М}} = 0,7.$$

5. Фактор на загуби

$$\theta_{\text{а}} = \tau_{\text{а}}/T = 0,52.$$
$$\theta_{\text{б}} = \tau_{\text{б}}/T = 0,514.$$

Електрични мрежи

Заменски шеми и параметри на елементите на електроенергетските мрежи

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

Општо за моделирањето на ЕЕС (1)

- Модел претставува упростен приказ на еден физички систем или појава. Тој служи за симулација на разните појави и процеси коишто се случуваат во моделираниот систем со цел тие да се проучуваат за да може да се предвиди неговото поведение во иднина.
- Постојат математички и физички модели.
  - Кај математичките модели појавите се опишуваат со математички релации или равенки.
  - Физичкиот модел претставува уред или систем со редуцирани димензии којшто е сосема сличен на моделираниот систем.
- Од физичките модели во анализите на ЕЕС некогаш, пред продорот на компјутерите во инженерството, се користеле т.н. „мрежни анализатори“.
- Не постојат универзални модели наменети за целосна анализа на некој систем иако се тежи тие да бидат што е можно погенерални.
  - За моделите е важно колку се тие точни, т.е. колку се реален одраз на набљудуваниот систем.
  - Еден научник рекол: „Не постојат егзактни модели. Некои од нив се и употребливи“.
  - Намената на моделите е овозможат да се дојде до некои сознанија за набљудуваниот објект на индиректен начин зашто тоа е полесно и поедноставно. Освен тоа за некои експерименти (како што се на пример кусите врски во ЕЕС) тешко би се добила дозвола да се изведуваат во практиката.

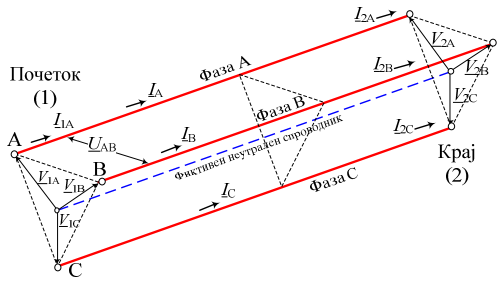
Општо за моделирањето на ЕЕС (2)

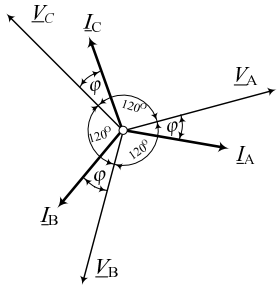
- Постојат разни поделби на моделите: линеарни и нелинеарни, статички и динамички, детерминистички и стохастички, итн.
- ЕЕС во основа претставуваат линеарни системи за коишто важи принципот на суперпозиција. При решавањето на разните работни режими во стационарна состојба ќе се применуваат статички линеарни детерминистички модели.

> Денешните научници ги заменија експериментите со математика и тие талкаат од една до друга равенка за на крајот да изградат структура која нема врска со реалноста.
>
> Никола Тесла, 1934.

Трифазни системи

Производството, пренесувањето и распределбата на ел. енергија се прави со трифазни системи. Ретко се користат еднофазни системи во нисконапонски мрежи за мали моќности.





Трите фазни струи и напони во било кој елемент од системот образуваат трифазен симетричен систем со директен редослед на фазите.

Решавањето може да се упрости така што наместо да решаваме трифазно коло доволно е преку воведувањето на „еднофазни“ заменски шеми да ги определиме приликите во само една од фазите, додека решението во другите две е изместено за 120°.

Модел на двожичен вод

Двоспроводен вод составен од идентични спроводника со радиуси r_p, поставени паралелно во воздух на меѓусебно растојание D.

$$L = \frac{\mu_0}{\pi}\left(\ln\frac{D}{r_p} + \frac{\mu_r}{4}\right); \quad \mu = \mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-4}\ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{km}}$$

$$x_{\text{контура}} = \omega L = \frac{\omega\mu_0}{\pi}\left(\ln\frac{D}{r_p} + \frac{1}{4}\right)$$

Реактанцијата x по единица должина на едниот од двата спроводника е

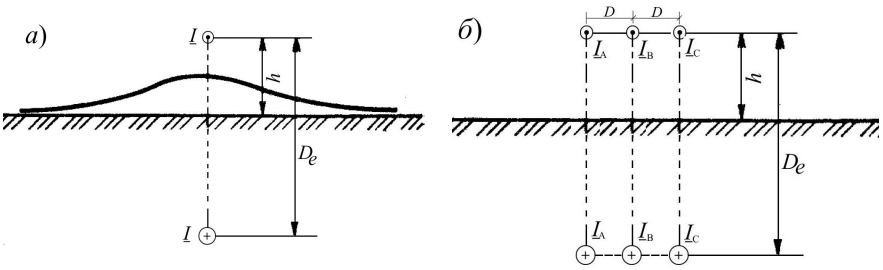
$$x = \frac{x_{\text{контура}}}{2} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi}\cdot\left(\ln\frac{D}{r_p} + \frac{1}{4}\right) = \omega\cdot\left(4,6052\cdot\log\frac{D}{r_p} + \frac{1}{2}\right)\cdot 10^{-4}\,\frac{\Omega}{\mathrm{km}}$$

Сопствената импеданција $\underline{z}$ по единиција должина на двоспроводниот вод за f = 50 Hz ($\omega = 2\pi f = 100\pi$) е

$$\underline{z} = r + jx = r + j\left(0,1445\cdot\log\frac{D}{r_p} + 0,0157\right)\frac{\Omega}{\mathrm{km}}$$

Модел на едноспроводен (двожичен) вод со повратен пат преку земјата

Едноспроводен вод формиран од хоризонтален спроводник на висина h над површината од земјата и самата земја како повратен пат на струјата. Преку овој модел ќе ги изведеме изразите за редна импеданција на трифазните водови.



Карсонов модел за систем спроводник – земја: а) за едноспроводен вод, б) за триспроводен вод.

Модел на едноспроводен (двожичен) вод со повратен пат преку земјата

- Теориските и експерименталните истражувања во 20-тите години на минатиот век од Риденберг (Rüdenberg) и Карсон (Carson) покажале дека системот спроводник – земја може да се сведе на двоспроводен вод.
- Вториот спроводник е замислен повратен спроводник со радиус од 1 m кој се наоѓа во земјата закопан на длабочина D_e.

$$D_e = 658,5 \cdot \sqrt{\rho/f} \quad \mathrm{m}.$$

Почва	Камената	Сува	Влажна	Морска вода
Спец. отпорност ρ (Ωm)	10000	1000	100	1
Екв. длабочина D_e (m)	9380	2960	938	94

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_p} + 0,0157 \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

Загуби на активна моќност во повратниот пат, $r_z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \approx 0,05\ \Omega/\mathrm{km}$

$$\underline{z}_s = (r + r_z) + j\left(0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_p} + 0,0157\right) \frac{\Omega}{\mathrm{km}}$$

Модел на трифазен вод со повратен пат

- Трифазните водови можат да се замислат како три парови спроводник – земја. Со оглед на тоа дека $D_e \gg h_i$ и $D_e \gg D_{ij}$ сосема е сеедно дали спроводниците имаат хоризонтален или друг распоред.
- Покрај сопствените импеданции ќе се појават и меѓусебни импеданции помеѓу секои парови контури со коишто се моделираат одделните двоспроводни водови.

$$\underline{z}_{ij} = r_z + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{D_{ij}} \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

- Сопствените $\underline{z}_s$ и меѓусебните подолжни импеданции $\underline{z}_m$ помеѓу фазните спроводници од трифазниот вод се

$$\underline{z}_s = (r + r_z) + j \cdot \left(0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_p} + 0,0157\right) \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}},$$

$$\underline{z}_m = \frac{\underline{z}_{\mathrm{AB}} + \underline{z}_{\mathrm{AC}} + \underline{z}_{\mathrm{BC}}}{3} = r_z + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{D_m} \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

Средно-геометриско растојание помеѓу фазните спроводници

$$D_m = \sqrt[3]{D_{\mathrm{AB}} \cdot D_{\mathrm{AC}} \cdot D_{\mathrm{BC}}}.$$

За хоризонтален распоред на фазните спроводници е

$$D_m = \sqrt[3]{D \cdot 2D \cdot D} = D \cdot \sqrt[3]{2} = 1,26 \cdot D.$$

Модел на трифазен вод со повратен пат

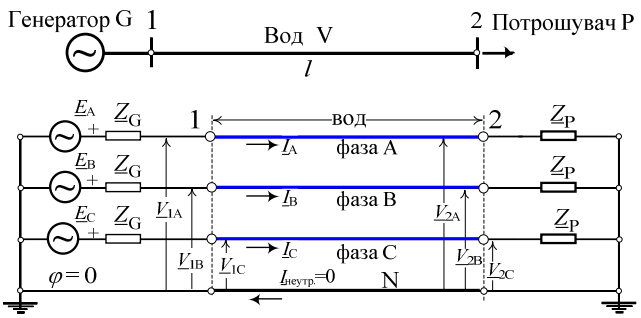
Разликата помеѓу сопствената и меѓусебната импеданција се нарекува погонска надолжна импеданција на трифазниот вод.

$$\underline{z} = \underline{z}_s - \underline{z}_m = r + jx = r + j \cdot (0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{r_p} + 0,0157) \ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

Пресметката на состојбите кај надземните водови во една мрежа за симетричен и урамнотежен работен режим се врши со помош на нивните погонски импеданции.

Погонска импеданција

Трифазна мрежа (коло) со трифазен генератор (G) со намотки врзани во ѕвезда, трифазен преносен вод (V) со должина l и симетричен трифазен потрошувач (P).



Бидејќи системот е симетричен важи $\underline{I}_{неутр.} = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$, што значи ѕвездиштата кај генераторот и потрошувачот ќе бидат на ист потенцијал за кој што ќе усвоиме $\varphi = 0 \Rightarrow$ неутралниот спроводник можеме да го отстраниме.

Погонска импеданција

Врска помеѓу напоните на двата краја од водот

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{1A} \\ \underline{V}_{1B} \\ \underline{V}_{1C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{V}_{2A} \\ \underline{V}_{2B} \\ \underline{V}_{2C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix}.$$

$$\underline{Z}_s = \underline{z}_s \cdot l = (r + r_z) \cdot l + j \cdot \left(0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_p} + 0,0157\right) \cdot l \, \frac{\Omega}{\mathrm{km}},$$

$$\underline{Z}_m = \underline{z}_m \cdot l = r_z \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \left(\log \frac{D_e}{D_m}\right) \cdot l \, \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

$$\underline{V}_{1A} = \underline{V}_{2A} + \underline{Z}_s \underline{I}_A + \underline{Z}_m \underline{I}_B + \underline{Z}_m \underline{I}_C = \underline{V}_{2A} + \underline{Z}_s \underline{I}_A + \underline{Z}_m (\underline{I}_B + \underline{I}_C),$$

$$\underline{I}_B + \underline{I}_C = -\underline{I}_A,$$

$$\underline{V}_{1A} = \underline{V}_{2A} + \underline{Z}_s \underline{I}_A - \underline{Z}_m \underline{I}_A = \underline{V}_{2A} + (\underline{Z}_s - \underline{Z}_m) \underline{I}_A = \underline{V}_{2A} + \underline{Z} \underline{I}_A,$$

Поради симетријата приликите во фазата А можат да се искажат како односи само помеѓу фазните напони и струи во таа фаза. Исто важи и за фазите В и С.

Погонска импеданција

$$\underline{V}_{1A} = \underline{V}_{2A} + \underline{Z} \underline{I}_A$$
$$\underline{V}_{1B} = \underline{V}_{2B} + \underline{Z} \underline{I}_B$$
$$\underline{V}_{1C} = \underline{V}_{2C} + \underline{Z} \underline{I}_C$$

Величината $\underline{Z} = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m$ којашто фигурира во релациите се нарекува **редна погонска импеданција** на трифазниот вод. Таа претставува вештачка, математички воведена, величина која нема физичка позадина и не може да се измери.

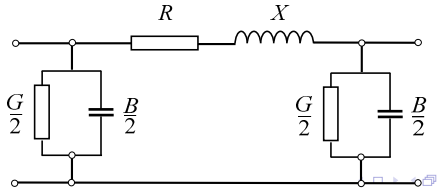
Заменски шеми на трифазните водови

Заменските шеми за трифазни симетрични водови се еднофазни.
По должината на водовите рамномерно се распределени нивните подолжни погонски параметри

- редната активна отпорност r,
- редната индуктивна отпорност x,
- напречната активна одводност g и
- напречната капацитивна проводност b.

За надземни водови со $l \leq 250$ km и за кабелски водови со $l \leq 50$ km, распределените параметри можат да се заменат со концентрирани

$$R = r \cdot l, \quad X = x \cdot l, \quad G = g \cdot l \quad \text{и} \quad B = b \cdot l$$



Редна активна отпорност

- Редната активна отпорност r на спроводниците со напречни пресеци што се користат во практика и $f = 50$ Hz е практично еднаква на нивната активна отпорност при еднонасочна струја. При 20°C таа е

$$r_{20} = \frac{1000}{34 \cdot A} = \frac{29,4}{A}\ \Omega/\mathrm{km}$$

каде што A е површината на напречниот пресек на алуминиумскиот дел од јажето, изразена во mm^2.

- При температура различна од 20°C активната отпорност е

$$r_\theta = r_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - 20)].$$

Температурниот коефициент на промена на отпорот (за Al и Cu) приближно изнесува $\alpha = 0,004 \quad 1/°\mathrm{C}$.

- Работната температура на спроводниците обично се движи помеѓу 30 и 40°C, затоа се користи релацијата

$$r = \frac{1000}{32 \cdot A} = \frac{31,25}{A}\ \Omega/\mathrm{km}.$$

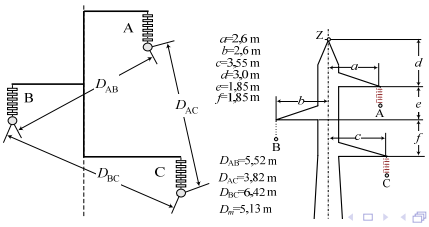
Погонската редна индуктивна отпорност

- Погонската редна индуктивна отпорност x на зависи од растојанијата меѓу спроводниците на водот и од нивните радиуси

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{r_p} + 0,0157\ \Omega/\mathrm{km},$$

  - r_p радиус на спроводникот
  - D_m средногеометриско растојание меѓу фазните спроводници

$$D_m = \sqrt[3]{D_{\mathrm{AB}} \cdot D_{\mathrm{AC}} \cdot D_{\mathrm{BC}}}.$$



Погонската редна индуктивна отпорност

- Равенката за x може да се напише во следниот облик

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s},$$

каде што D_s се нарекува сопствено средногеометриско растојание.

- За масивни спроводници или спроводници изведени во форма на јажиња од еднороден материјал

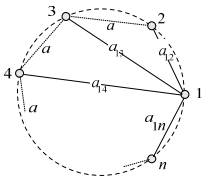
$$D_s = r'_p = e^{-\frac{1}{4}} \cdot r_p = 0,7788 \cdot r_p.$$

- За алучел-јажињата (Al/Č) со однос на пресеците $\varepsilon = A_{\mathrm{Al}}/A_{\mathrm{Fe}} = 6:1$ приближно важи

$$D_s \approx 0,81 \cdot r_p.$$

Спроводници во сноп

- За пренесување на големи моќности со надземните водови се користат високи напони и големи пресеци на фазните спроводници кои се направени со повеќе спроводници по фаза, односно со спроводници во сноп. Рамностран многуаголник со страна a од 30 до 50 cm.



Еквивалентен спроводник со сопствено средногеометриско растојание

$$D_s = \sqrt[n]{r'_p \cdot \prod_{i=2}^{n} a_{1i}} = \sqrt[n]{r'_p \cdot a_{12} \cdot a_{13} \cdot \ldots \cdot a_{1n}}.$$

$$n = 2: \; D_s = \sqrt{r'_p \cdot a} \quad n = 3: \; D_s = \sqrt[3]{r'_p \cdot a^2} \quad n = 4: \; D_s = \sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r'_p \cdot a^3}$$

Спроводници во сноп

- Со спроводниците во сноп се намалува x. Кај сноп од два спроводника x е помало за 15 до 20% во споредба со случајот со еден спроводник по фаза. Ако пак снопот има три спроводници тогаш x се намалува за 25 до 30%.
- Ако на едни исти столбови се поставени две тројки на спроводници (двосистемски вод) x се намалува за 15 до 20%.
- Погонските реактанции x на надземните водови се неколку пати поголеми отколку реактанциите на трифазните кабли.

Вид на водот	$x(\Omega/\mathrm{km})$
Надземен, до 1 kV	0,34
Надземен, 6 - 10 kV	0,38
Надземен, 20 kV, 35 kV, 110 kV	0,40
Надземен, 220 kV	0,41
Надземен, 380 kV	0,34
Кабелски, до 1 kV	0,06
Кабелски, 6 - 10 kV	0,08
Кабелски, 20 kV	0,11
Кабелски, 35 kV	0,13

Напречната активна одводност

- Се определува врз основа на загубите на активна моќност во изолацијата на водот. Загубите се сосема мали затоа обично е $g \approx 0$.
- Кај високонапонските водови со номинален напон 110 kV и повисок во определени услови се јавува празнење околу спроводниците наречено корона. Таа е особено интензивна при влажно време кога загубите се за 10 па и повеќе пати поголеми од вообичаените. Најефикасен начин за смалување на загубите на моќност поради короната е примена на спроводници во сноп.
- Најмали дозволени пресеци кај надземните водови заради намалување на ефектот на корона

Номинален напон на водот (kV)	Најмал дозволен пресек на Al/Č–јаже
110 kV	70/12
220 kV	240/40
380 kV	2×490/65

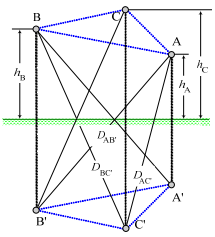
- Загубите поради короната изнесуваат околу 1 kW/km за 110 kV надземни водови, односно неколку kW/km за надземни водови со повисок напон. Кај надземните водови со напон 500 kV и 750 kV при лошо време загубите поради короната можат да достигнат и вредности преку 100 kW/km.

Погонска напречна капацитивна спроводност

- Погонската капацитивност по единица должина C'_p на трифазен вод е

$$C'_p = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \dfrac{2H_s \cdot D_m}{H_m \cdot r_p}},$$

  - r_p - радиус на спроводниците
  - $H_s = \sqrt[3]{h_\mathrm{A} \cdot h_\mathrm{B} \cdot h_\mathrm{C}}$
  - $D_m = \sqrt[3]{D_\mathrm{AB} \cdot D_\mathrm{AC} \cdot D_\mathrm{BC}}$
  - $H_m = \sqrt[3]{D_\mathrm{AB'} \cdot D_\mathrm{AC'} \cdot D_\mathrm{BC'}}$



Погонска напречна капацитивна спроводност

$$b = \omega \cdot C'_p = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{2H_s \cdot D_m}{H_m \cdot r_p}}, \ \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{km}}.$$

Кај реалните водови обично е $2H_s \approx H_m$ па може да се напише

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_m}{r_p}} \ \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{km}}.$$

Кога не е позната геометријата на фазните спроводници за b може да се користат следните вредности

- b = 2,6 – 2,8 μS/km за водови 110 kV и 220 kV, со еден спроводник по фаза;
- b = 3,3 μS/km за водови 380 kV, со два спроводника по фаза.

Кај кабелските водови вредностите на погонската капацитивна спроводност по единица должина b се значително поголеми.

Погонска напречна капацитивна спроводност

Ако претпоставиме дека напонот долж водот е константен (не е сосема така) капацитивната струја на водот е

$$I_C = V \cdot b \cdot l = B \cdot V,$$

каде што V е фазниот напон.
Капацитивната моќност на водот Q_C е

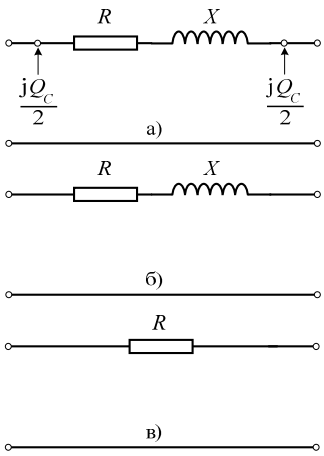
$$Q_C = 3 \cdot V \cdot I_C = 3 \cdot B \cdot V^2 = B \cdot U^2,$$

каде U е меѓуфазниот напон на водот ($U = \sqrt{3} \cdot V$).

Номинален напон на водот U_n (kV)	Генерирана реактивна моќност Q_C (Mvar/100 km)
110	3,3
220	13,0
380	50,0

Трижилен кабел за напон 20 kV, со пресек 150 mm^2 и со должина 100 km, при номинален напон би генерирал околу 5,6 Mvar. Ако кабелот би го сочинувале три едножилни кабли тој би генерирал околу 3,3 Mvar на 100 km (≈30 пати повеќе од еден 20 kV надземен вод).

Разни облици на заменска шема на вод



а) упростен облик на заменската шема со земање предвид на Q_C, б) заменска шема за СН и НН надземни водови и кабли, в) заменска шема за НН вод со мал пресек

Погонска бранова импеданција

- Загуби на реактивна моќност во редната индуктивна отпорност

$$Q_X = 3 \cdot X \cdot I^2,$$

- Генерирање реактивна моќност во погонскиот капацитет на водот

$$Q_C = 3 \cdot B \cdot V^2.$$

- Ако водот струјно го оптовариме така што ќе се биде $Q_C = Q_X$ за односот помеѓу напонот и струјата важи

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{X}{B}} = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{L'_p}{C'_p}} = Z_V$$

Z_V е погонска бранова импеданција на водот

- Ако на крајот од водот е приклучен чисто активен потрошувач чијашто отпорност е точно еднаква на Z_V тогаш водот пренесува природна моќност P_N. Во тој случај напонот и струјата насекаде долж водот се константни по модул и се во фаза.

$$Z_V = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \ln \frac{D_m}{r_p}$$

$$Z_V = 60 \cdot \ln \frac{D_m}{r_p} = 138 \cdot \log \frac{D_m}{r_p}$$

Пример 1

110 kV надземни водови во Република Македонија се главно изградени со челично-решеткасти столбови од типот „S“, производ на ЕМО-Охрид и со спроводници од алучел-јаже Al/Č 240/40 mm^2 произведени според стандардот МКС.Н.Ц1.351. Да се пресметаат подолжните параметри r, x и b на овие водови. Колкава е нивната бранова импеданција Z_V и колкава е нивната природна моќност P_N. Колкаво е струјното оптоварување на водот I_N во режим на пренос на природна моќност, во (A) и во (%) од неговото трајно дозволено оптоварување кое за летни услови изнесува I_d = 530 A.

Од табела отчитуваме податоци за јажето: пресек на ауминиумовиот плашт A = 243,0 mm^2; пречник $d_p = 2r_p$ = 21,9 mm.

$$r = \frac{31,25}{A} = \frac{31,25}{243,0} = 0,129\ \frac{\Omega}{\mathrm{km}}.$$

$$D_m = \sqrt[3]{5,52 \cdot 3,82 \cdot 6,42} = 5,13\ \mathrm{m},$$

$$x = 0,1445 \cdot \log\left(\frac{D_m}{D_s}\right) = 0,1445 \cdot \log\left(\frac{5,13}{0,81 \cdot 10,95 \cdot 10^{-3}}\right) = 0,399\ \frac{\Omega}{\mathrm{km}},$$

Пример 1

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(D_m/r_p)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(5,13/0.01095)} = 2,84 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{km}}.$$

$$Z_V = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{0,399}{2,84 \cdot 10^{-6}}} = 375\ \Omega.$$

$$I_N = \frac{V_\mathrm{n}}{Z_V} = \frac{U_\mathrm{n}}{\sqrt{3} \cdot Z_V} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 375} = 0,169\ \mathrm{kA},$$

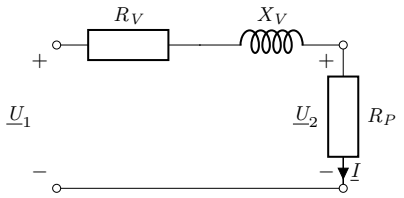
$$I_N(\%) = 100 \cdot \frac{I_N}{I_d} = 100 \cdot \frac{169}{530} = 32\ \%,$$

$$P_N = 3 \cdot V_\mathrm{n} \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot U_\mathrm{n} \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0,169 = 32,26\ \mathrm{MW}.$$

Значи кога водот пренесува природна моќност тој е оптоварен само со околу 1/3 од неговата најголема трајно дозволена струја.

Пример 2

Водот од претходниот пример има должина $l = 50\,\mathrm{km}$ и на неговиот крај е приклучен потрошувач кој е претставен со отпорник $R_P = 250\,\Omega$. Познати се неговите параметри $r = 0,129\,\Omega/\mathrm{km}$ и $x = 0,399\,\Omega/\mathrm{km}$. Да се смета дека е $b = 0$. Напонот на почетокот на водот е $U_1 = 112\,\mathrm{kV}$. Да се пресмета напонот на крајот од водот, струјата во водот и моќноста на потрошувачот.



$$R_V = r \cdot l = 0,129 \cdot 50 = 6,45\,\Omega \qquad X_V = x \cdot l = 0,399 \cdot 50 = 19,95\,\Omega$$

$$\underline{U}_2 = \frac{R_P}{R_P + R_V + jX_V} \cdot \underline{U}_1 = \frac{250}{250 + 6,45 + j19,95} \cdot 112 = (108,5263 - j8,4426)\,\mathrm{kV}$$

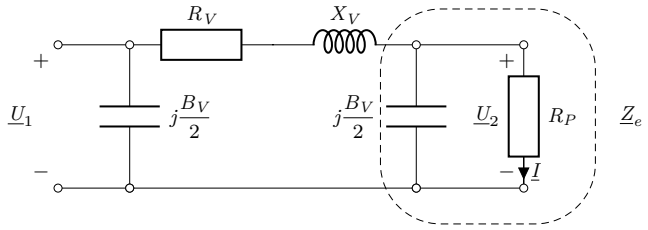
$$U_2 = 108,8542\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -4,448^\circ$$

$$P_P = \frac{U_2^2}{R_P} = \frac{108,8542^2}{250} = 47,397\,\mathrm{MW}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}R_P} = \frac{108,5263 - j8,4426}{\sqrt{3} \cdot 250} = (0,2506 - j0,0195)\,\mathrm{kA} \qquad I = 0,2514\,\mathrm{kA} = 251,4\,\mathrm{A}$$

Пример 3

Да се пресмета напонот на крајот на водот од претходниот пример со уважување на капацитетот на водот преку параметарот $b = 2,84 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{S/km}$.



$$B_V = b \cdot l = 2,84 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 142 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{S}$$

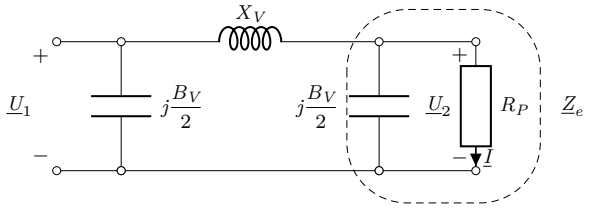
$$\underline{Z}_e = \frac{R_P \cdot \frac{2}{jB_V}}{R_P + \frac{2}{jB_V}} = \frac{2 \cdot R_P}{2 + jB_V \cdot R_P} = \frac{2 \cdot 250}{2 + j \cdot 142 \cdot 10^{-6} \cdot 250} = (249,9213 - j4,4361)\,\Omega$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{Z}_e}{\underline{Z}_e + R_V + jX_V} \cdot \underline{U}_1 = \frac{249,9213 - j4,4361}{249,9213 - j4,4361 + 6,45 + j19,95} \cdot 112$$

$$\underline{U}_2 = (108,6670 - j8,5138)\,\mathrm{kV} \qquad U_2 = 109\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -4,478^\circ$$

Пример 4

Водот од примерот 1 има должина $l = 50\,\mathrm{km}$ и на неговиот крај е приклучен потрошувач кој е претставен со отпорник $R_P = Z_V = \sqrt{x/b} = 375\,\Omega$. Да се смета дека е $r = 0$, $x = 0,399\,\Omega/\mathrm{km}$ и $b = 2,84 \cdot 10^{-6}\,\Omega/\mathrm{km}$. Напонот на почетокот на водот е $U_1 = 112\,\mathrm{kV}$. Да се пресмета напонот на крајот од водот.



$$X_V = x \cdot l = 0,399 \cdot 50 = 19,95\,\Omega \qquad B_V = b \cdot l = 2,84 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 142 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{S}$$

$$\underline{Z}_e = \frac{R_P \cdot \frac{2}{jB_V}}{R_P + \frac{2}{jB_V}} = \frac{2 \cdot R_P}{2 + jB_V \cdot R_P} = \frac{2 \cdot 375}{2 + j \cdot 142 \cdot 10^{-6} \cdot 375} = (374,7344 - j9,9773)\,\Omega$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{Z}_e}{\underline{Z}_e + jX_V} \cdot \underline{U}_1 = \frac{374,7344 - j9,9773}{374,7344 - j9,9773 + j19,95} \cdot 112$$

$$\underline{U}_2 = (111,8414 - j5,9584)\,\mathrm{kV} \qquad U_2 = 112\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -3,05^\circ$$

Пример 5

Да се реши преходниот пример за случај кога должината на водот изнесува $l = 100\,\mathrm{km}$.

$$X_V = x \cdot l = 0,399 \cdot 100 = 39,9\,\Omega \qquad B_V = b \cdot l = 2,84 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 284 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{S}$$

$$\underline{Z}_e = \frac{R_P \cdot \frac{2}{jB_V}}{R_P + \frac{2}{jB_V}} = \frac{2 \cdot R_P}{2 + jB_V \cdot R_P} = \frac{2 \cdot 375}{2 + j \cdot 284 \cdot 10^{-6} \cdot 375} = (373,940 - 19,912)\,\Omega$$

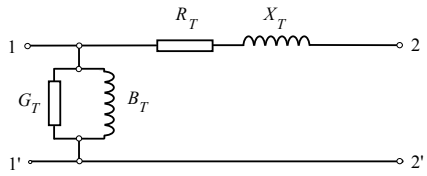
$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{Z}_e}{\underline{Z}_e + jX_V} \cdot \underline{U}_1 = \frac{373,940 - 19,912}{373,940 - 19,912 + j39,9} \cdot 112$$

$$\underline{U}_2 = (111,363 - 11,917)\,\mathrm{kV} \qquad U_2 = 112\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -6,10^\circ$$

Ефективната вредност на напонот на водот не зависи од должината. Фазниот агол е негативен и се менува за $6^\circ/100\,\mathrm{km}$.

Двонамотни трифазни трансформатори

Независно од тоа како им се поврзани фазните намотки, двонамотните трифазни трансформатори најчесто ги претставуваме со заменската Г-шема.



Заменската Г-шема на еден двонамотен трифазен трансформатор се карактеризира со 4 параметри

- активна отпорност R_T и реактивна отпорност X_T на намотките на трансформаторот ($X_T \gg R_T$)
- активна спроводност G_T и реактивна спроводност B_T на гранката на магнетизирање ($B_T \gg G_T$)
- параметрите ги определуваме од податоците за струјата I_0 и загубите ΔP_0 од обидот на празен и од напонот на куса врска U_k и загубите ΔP_k од обидот на куса врска.

Двонамотни трифазни трансформатори

$$\Delta P_0 \approx \Delta P_{\mathrm{Fe}}.$$
$$\Delta P_0 = \Delta P_{\mathrm{Fe}} = 3G_T \cdot V_{\mathrm{n}}^2 = G_T \cdot U_{\mathrm{n}}^2,$$
$$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_{\mathrm{n}}^2}.$$

- Струјата на празен од I_0 изнесува од 0,1% до 3% од номиналната струја на трансформаторот
- Активната компонента е за 4 до 6 пати помала од реактивната компонента, поради што адмитанцијата на магнетизирање $\underline{Y}_T = G_T + jB_T$ е по модул приближно еднаква на реактивната компонента, т.е. $|\underline{Y}_T| \approx |B_T|$

$$|\underline{Y}_T| \cdot U_{\mathrm{n}} = \sqrt{3} \cdot \frac{i_0\%}{100} \cdot I_{\mathrm{n}} = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot I_{\mathrm{n}}}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_{\mathrm{n}}}{U_{\mathrm{n}}},$$
$$B_T \approx -|\underline{Y}_T| = -\frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_{\mathrm{n}}}{U_{\mathrm{n}}^2}.$$

Знакот минус укажува на индуктивниот карактер на гранката.

Двонамотни трифазни трансформатори

- При обидот на куса врска секундарната намотка од трансформаторот кусо се спојува, а на примарната намотка се носи напонот U_k при кој во намотките од трансформаторот ќе течат номинални струи. Загубите на активна моќност во намотките (бакарот) и во железото ќе ги означиме со ΔP_k.
- Бидејќи U_k е мал (од 4% до 12% од номиналниот) магнетската индукција во јадрото трансформаторот е мала така што загубите во железото се безначајни во однос на загубите во бакарот.

$$\Delta P_{\mathrm{Cun}} \approx \ \Delta P_k = 3 \cdot R_T I_{\mathrm{n}}^2 = 3 \cdot R_T \cdot I_{\mathrm{n}}^2 \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{U_{\mathrm{n}}^2} = R_T \cdot \frac{S_{\mathrm{n}}^2}{U_{\mathrm{n}}^2}$$

$$R_T = \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2}.$$

- Напонот на куса врска U_k обично се изразува во проценти од номиналниот напон на трансформаторот и тогаш се означува со $u_k\%$ или само со u_k.

$$U_k = \frac{u_k\%}{100} \cdot U_{\mathrm{n}} = \sqrt{3} \cdot Z_T \cdot I_{\mathrm{n}},$$
$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}}.$$
$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}.$$

Пример 6

Дистрибутивен трансформатор за снижување на напонот тип TD400, производ на ЕМО-Охрид, ги има следните номинални податоци: номинален преносен однос $U_{1\mathrm{n}}/U_{2\mathrm{n}}$ = 10/0,4 kV/kV; S_n = 400 kVA; напон на куса врска u_k = 4%; струја на празен од i_0 = 2,1%; загуби во бакар (загуби поради оптоварување) ΔP_{Cun} = 4600 W; загуби во празен од (загуби во железо) ΔP_{Fe} = 930 W. Да се пресметаат параметрите R_T, X_T, G_T и B_T на неговата Г-заменска шема, сведени кон 10 kV страна.

$$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_\mathrm{n}^2} = \frac{930}{10000^2} = 9,3\ \mu\mathrm{S}.$$

$$|\underline{Y}_T| = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_\mathrm{n}}{U_\mathrm{n}^2} = \frac{2,1}{100} \cdot \frac{400 \cdot 10^3}{10000^2} = 84\ \mu\mathrm{S}.$$

$$B_T = -\sqrt{Y_T^2 - G_T^2} = -\sqrt{84^2 - 9,3^2} = -83,5\ \mu\mathrm{S}.$$

$$\underline{Y}_T = G_T + jB_T = (9,3 - j83,5)\ \mu\mathrm{S}.$$

Пример 6

$$R_T = \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n}^2} = 4600 \cdot \frac{10000^2}{400000^2} = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10^2}{0,4^2} = 2,875\ \Omega,$$

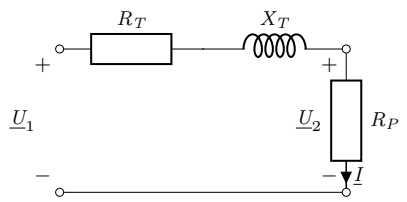
$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{10^2}{0,4} = 10\ \Omega.$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{10^2 - 2,875^2} = 9,58\ \Omega.$$

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = (2,875 + j9,58)\ \Omega.$$

Пример 7

На секундарот на трансформаторот од претходниот пример е приклучен потрошувач кој е претставен со отпорник $R_P = 300\,\Omega$. Да се смета дека е $G_T = 0$ и $B_T = 0$. Напонот на примарот на трансформаторот е $U_1 = 10,5\,\mathrm{kV}$. Да се пресмета напонот на секундарот на трансформаторот, струјата во трансформаторот и моќноста на потрошувачот.



$$R_T = 2,875\,\Omega \qquad X_T = 9,58\,\Omega$$

$$\underline{U}_2 = \frac{R_P}{R_P + R_T + jX_T} \cdot \underline{U}_1 = \frac{300}{300 + 2,875 + j9,58} \cdot 10,5 = (10,3899 - j0,3286)\,\mathrm{kV}$$

$U_2 = 10,395\,\mathrm{kV}$ $\Rightarrow$ Проблем: $U_2 \gg U_{2n} \Longleftrightarrow U_2 = 25,987 \cdot U_{2n}$ $\qquad \theta_2 = -1,812°$

$$P_P = 3 \cdot \frac{\left(U_2/\sqrt{3}\right)^2}{R_P} = \frac{U_2^2}{R_P} = \frac{10,395^2}{300} = 0,3602\,\mathrm{MW} = 360,2\,\mathrm{kW}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot R_P} = \frac{10,3899 - j0,3286}{\sqrt{3} \cdot 300} = (0,01999 - j0,00063)\,\mathrm{kA} \qquad I = 0,02\,\mathrm{kA} = 20\,\mathrm{A}$$

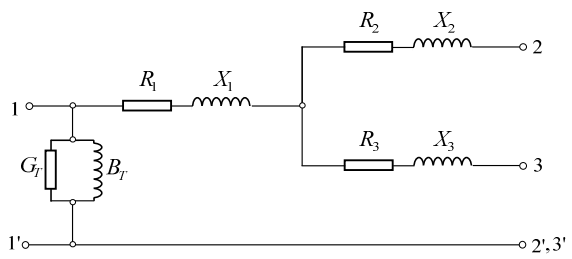
Пример 7– сведување

- Пресметаните параметри на трансформаторот важат за напонското ниво на примарот (во формулите е користено $U_n = 10\,\mathrm{kV}$)
- Од напонско ниво 10 kV сакаме да се префрлиме на напонско ниво 0,4 kV – коефициентот на пренос е $k = 0,4/10 = 0,04$: пресметаниот напон на секундарот треба да се помножи со k, струјата да се подели со k, импеданциите да се помножат со k^2, моќноста останува иста

$$U_2'' = k \cdot U_k = 0,04 \cdot 10,395 = 0,4158\,\mathrm{kV} = 415,8\,\mathrm{V}$$
$$I'' = I/k = 20/0,04 = 500\,\mathrm{A}$$
$$R_P'' = k^2 \cdot R_P = 0.04^2 \cdot 300 = 0,48\,\Omega$$
$$P_P = \frac{\left(U_2''\right)^2}{R_P''} = \frac{0,4158^2}{0,48} = 0,3602\,\mathrm{MW} = 360,2\,\mathrm{kW}$$

- Бидејќи е $10/0,4 = 25$ горните резултати можеме да ги толкуваме и вака: напонот е 25 пати помал, струјата е 25 пати поголема, импеданцијата е $25^2 = 625$ пати помала, моќноста е иста.

Тринамотни трифазни трансформатори



- Гранката на магнетизирање, како и кај двонамотниот трифазен трансформатор, ќе ја приклучиме на почетокот од примарната намотка (заменска Г-шема). Параметрите ги пресметуваме на истиот начин.
- Активните и реактивните отпорности на намотките се определуваат врз основа на податоците добиени од обидите на куса врска: примар-секундар, примар-терциер, секундар-терциер.

Тринамотни трифазни трансформатори

- Обид на куса врска примар-секундар

$$R_1 + R_2 = R_{12} = \Delta P_{k12} \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n12}^2} \quad X_1 + X_2 = X_{12} = \frac{u_{k12}\%}{100} \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n12}}$$

- Обид на куса врска примар-терциер

$$R_1 + R_3 = R_{13} = \Delta P_{k13} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n13}^2} \quad X_1 + X_3 = X_{13} = \frac{u_{k13}\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n13}}$$

- Обид на куса врска секундар-терциер

$$R_2 + R_3 = R_{23} = \Delta P_{k23} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n23}^2} \quad X_2 + X_3 = X_{23} = \frac{u_{k23}\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n23}}$$

Два системи од по 3 линеарни равенки со 3 непознати за определување на R_1, R_2 и R_3 и за определување на X_1, X_2 и X_3.

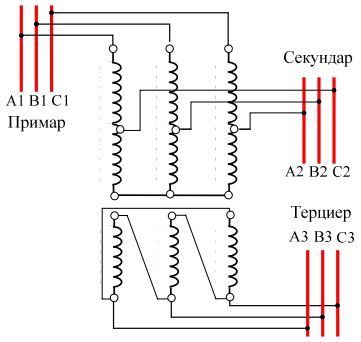
Тринамотни трифазни трансформатори

$$R_1 = (R_{12} + R_{13} - R_{23})/2,$$
$$R_2 = (R_{12} + R_{23} - R_{13})/2,$$
$$R_3 = (R_{13} + R_{23} - R_{12})/2.$$

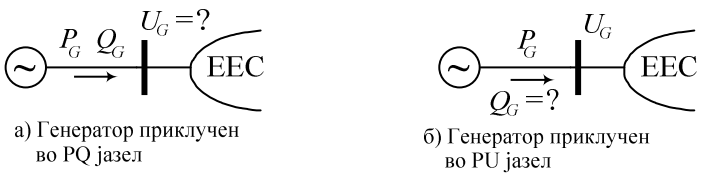
$$X_1 = (X_{12} + X_{13} - X_{23})/2,$$
$$X_2 = (X_{12} + X_{23} - X_{13})/2,$$
$$X_3 = (X_{13} + X_{23} - X_{12})/2.$$

Трифазни автотрансформатори

- Низ заедничката намотка тече струја еднаква на разликата на секундарната и примарната струја. Поради тоа спроводниците во заедничката намотка може да имаат и помал напречен пресек во кај двонамотните трансформатори со иста моќност.
- Терциерната намотка е обично врзана во триаголник и е галвански одвоена од примарната и секундарната намотка.
- Начинот на пресметување на параметрите на одделните намотки е сосема ист како и кај тринамотните трансформатори.

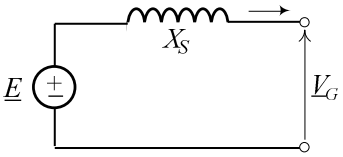


Синхрони генератори



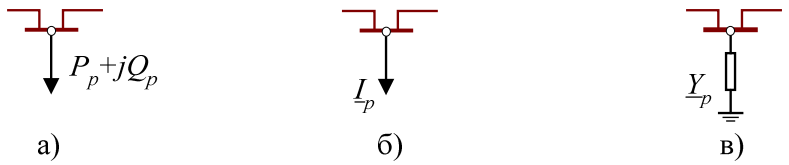
а) Генератор приклучен во PQ јазел

б) Генератор приклучен во PU јазел



$$X_S = \frac{x_s\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}.$$

Оптоварување на потрошувачите



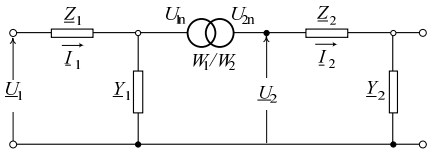
$$\underline{I}_p = \frac{\underline{S}_p^*}{\sqrt{3}\cdot \underline{U}_p^*} = \frac{P_p - jQ_p}{\sqrt{3}\cdot \underline{U}_p^*}.$$

$$\underline{Y}_p = \frac{\underline{S}_p^*}{U_p^2}$$

$$U_p \approx U_n$$

Сведување на параметрите во мрежи со трансформатори

Пред да се пристапи кон решавањето на мрежата, ќе треба да се изврши сведување на сите електрични величини на едно исто напонско ниво.



$$\underline{U}_{\text{сведено}} = k_{\mathrm{T}}\cdot \underline{U} \qquad \underline{I}_{\text{сведено}} = \frac{1}{k_{\mathrm{T}}}\cdot \underline{I}$$

$$\underline{Z}_{\text{сведено}} = k_{\mathrm{T}}^2\cdot \underline{Z} \qquad \underline{Y}_{\text{сведено}} = \frac{1}{k_{\mathrm{T}}^2}\cdot \underline{Y},$$

каде што k_{T} е актуелниот преносен однос на трансформаторот, дефиниран како однос на бројот на навивки на намотката од онаа страна на трансформаторот на која вршиме сведување и бројот на навивки на намотката на трансформаторот која се наоѓа на страната чии параметри ги сведуваме.

Сведување на параметрите во мрежи со трансформатори

Ако сакаме да вршиме сведување на величините $\underline{U}_1, \underline{I}_1, \underline{Z}_1$ и $\underline{Y}_1$ на страната со номинален напон $U_{2\mathrm{n}}$ и ако нивните сведени вредности ги означиме со индексот ($''$), тогаш ќе имаме

$$k_{\mathrm{T}} = \frac{W_2}{W_1}; \quad \underline{U}_1'' = k_{\mathrm{T}}\cdot \underline{U}_1; \quad \underline{I}_1'' = \frac{\underline{I}_1}{k_{\mathrm{T}}}; \quad \underline{Z}_1'' = k_{\mathrm{T}}^2\cdot \underline{Z}_1; \quad \underline{Y}_1'' = \frac{\underline{Y}_1}{k_{\mathrm{T}}^2}.$$

Ако сакаме величините $\underline{U}_2, \underline{I}_2, \underline{Z}_2$ и $\underline{Y}_2$ да ги сведеме на напонско ниво $U_{1\mathrm{n}}$, тогаш соодветните сведени вредности ќе бидат

$$k_{\mathrm{T}} = \frac{W_1}{W_2}; \quad \underline{U}_2' = k_{\mathrm{T}}\cdot \underline{U}_2; \quad \underline{I}_2' = \frac{\underline{I}_2}{k_{\mathrm{T}}}; \quad \underline{Z}_2' = k_{\mathrm{T}}^2\cdot \underline{Z}_2; \quad \underline{Y}_2' = \frac{\underline{Y}_2}{k_{\mathrm{T}}^2}.$$

Единични вредности

- Проблемот на сведувањето на електричните мрежи можеме да го решиме и со примена на единичните величини (pu, per unit).
- Единичната вредност на една величина се дефинира како количник од посматраната величина и една произволно избрана вредност, која има иста димензија како и посматраната величина и која се нарекува базна величина.
- За секоја електрична величина (напон $\underline{U}$, струја $\underline{I}$, моќност $\underline{S}$, импеданција $\underline{Z}$ или адмитанција $\underline{Y}$) се избира по една базна величина: $U_{\mathrm{B}}, I_{\mathrm{B}}, S_{\mathrm{B}}, Z_{\mathrm{B}}$ и Y_{B}.

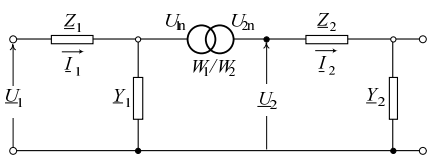
Единични вредности

- Наместо да се одберат сите 5 базни величини независно една од друга, можно е да се изберат само две од нив произволно, додека останатите 3 базни величини ќе можат да се изразат преку усвоените две. Како погодно се покажало да се врши избор на базната моќност S_{B} и базниот напон U_{B}

$$I_{\mathrm{B}} = \frac{S_{\mathrm{B}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\mathrm{B}}}; \quad Z_{\mathrm{B}} = \frac{U_{\mathrm{B}}}{\sqrt{3}\cdot I_{\mathrm{B}}} = \frac{U_{\mathrm{B}}^2}{S_{\mathrm{B}}}; \quad Y_{\mathrm{B}} = \frac{1}{Z_{\mathrm{B}}} = \frac{S_{\mathrm{B}}}{U_{\mathrm{B}}^2}.$$

- Кога се работи за мрежи со 2 или повеќе напонски нивоа, е потребно за секое напонско ниво да имаме по еден систем од 5 базни величини. Притоа односот на базните напони задолжително мора да биде усогласен со актуелниот преносен однос (т.е. со односот на бројот на навивките) на трансформаторот со кој се поврзани деловите од мрежата со разни напонски нивоа. Базната моќност S_{B} е насекаде во мрежата иста.

Единични вредности



Ако за делот од мрежата со номинален напон U_{n1} за базниот напон и базната моќност усвоиме одредени вредности U_{B1} и S_{B1}, тогаш останатите базни величини кои се однесуваат на тој дел на мрежата ќе бидат

$$I_{\mathrm{B1}} = \frac{S_{\mathrm{B1}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\mathrm{B1}}}; \quad Z_{\mathrm{B1}} = \frac{U_{\mathrm{B1}}}{\sqrt{3}\cdot I_{\mathrm{B1}}} = \frac{U_{\mathrm{B1}}^2}{S_{\mathrm{B1}}}; \quad Y_{\mathrm{B1}} = \frac{1}{Z_{\mathrm{B1}}} = \frac{S_{\mathrm{B1}}}{U_{\mathrm{B1}}^2}.$$

За делот од мрежата со номинален напон U_{n2} базните величини ќе бидат

$$S_{\mathrm{B2}} = S_{\mathrm{B1}}; \quad U_{\mathrm{B2}} = U_{\mathrm{B1}}\cdot\frac{W_2}{W_1}; \quad I_{\mathrm{B2}} = \frac{S_{\mathrm{B2}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\mathrm{B2}}} \equiv I_{\mathrm{B1}}\cdot\frac{W_1}{W_2},$$

$$Z_{\mathrm{B2}} = \frac{U_{\mathrm{B2}}^2}{S_{\mathrm{B2}}} = Z_{\mathrm{B1}}\cdot\left(\frac{W_2}{W_1}\right)^2; \quad Y_{\mathrm{B2}} = \frac{S_{\mathrm{B2}}}{U_{\mathrm{B2}}^2} = Y_{\mathrm{B1}}\cdot\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2.$$

Единични вредности

$$\underline{U}_{1.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{U}_1}{U_{\mathrm{B1}}}; \quad \underline{I}_{1.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{I}_1}{I_{\mathrm{B1}}}; \quad \underline{Z}_{1.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{Z}_1}{Z_{\mathrm{B1}}}; \quad \underline{Y}_{1.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{Y}_1}{Y_{\mathrm{B1}}},$$

$$\underline{U}_{2.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{U}_2}{U_{\mathrm{B2}}}; \quad \underline{I}_{2.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{I}_2}{I_{\mathrm{B2}}}; \quad \underline{Z}_{2.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{Z}_2}{Z_{\mathrm{B2}}}; \quad \underline{Y}_{2.\mathrm{pu}} = \frac{\underline{Y}_2}{Y_{\mathrm{B2}}}.$$

Пример 8

На секундарот на еден трансформатор 10/0,4 kV/kV со познати параметри $R_T = 2,875\,\Omega$ и $X_T = 9,58\,\Omega$ пресметани со напонот на примарната е приклучен потрошувач кој е претставен со отпорник $R_P = 0,48\,\Omega$. Напонот на примарот на трансформаторот е $U_1 = 10,5\,\mathrm{kV}$. Да се пресмета напонот на секундарот на трансформаторот, струјата во двете намотки и моќноста на потрошувачот со помош на единични вредности.

$$S_B = 1\,\mathrm{MVA} \quad U_{B1} = 10\,\mathrm{kV} \quad U_{B2} = 0,4\,\mathrm{kV}$$

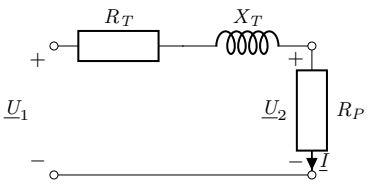
$$Z_{B1} = \frac{U_{B1}^2}{S_b} = \frac{10^2}{1} = 100\,\Omega \quad Z_{B2} = \frac{U_{B2}^2}{S_b} = \frac{0,4^2}{1} = 0,16\,\Omega$$

$$I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B1}} = \frac{1}{\sqrt{3}\cdot 10} = 0,0577\,\mathrm{kA} \quad I_{B2} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B2}} = \frac{1}{\sqrt{3}\cdot 0,4} = 1,4434\,\mathrm{kA}$$

$$R_T = \frac{2,875}{100} = 0,02875\,\mathrm{pu} \quad X_T = \frac{9,58}{100} = 0,0958\,\mathrm{pu} \quad R_P = \frac{0,48}{0,16} = 3\,\mathrm{pu}$$

$$U_1 = \frac{10,5}{10} = 1,05\,\mathrm{pu}$$

Пример 8



$$\underline{U}_2 = \frac{R_P}{R_P + R_T + jX_T}\cdot \underline{U}_1 = \frac{3}{3 + 0,02875 + j0,0958}\cdot 1,05 = (1,03899 - j0,03286)\,\mathrm{pu}$$

$$U_2 = 1,0395\,\mathrm{pu} = 1,0395\cdot 0,4\,\mathrm{kV} = 0,4158\,\mathrm{kV} \qquad \theta_2 = -1,812^\circ$$

$$P_P = \frac{U_2^2}{R_P} = \frac{1,0395^2}{3} = 0,3602\,\mathrm{pu} = 0,3602\,\mathrm{MW} = 360,2\,\mathrm{kW}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{R_P} = \frac{1,03899 - j0,03286}{3} = (0,34633 - j0,01096)\,\mathrm{pu} \qquad I = 0,3465\,\mathrm{pu}$$

$$I' = I\cdot I_{B1} = 0,3465\cdot 0,0577 = 0,02\,\mathrm{kA} \quad I'' = I\cdot I_{B2} = 0,3465\cdot 1,4434 = 0,5\,\mathrm{kA}$$

Електрични мрежи

Решавање на радијални електрични мрежи

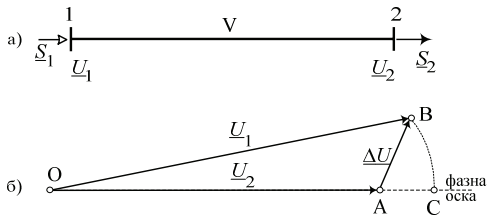
М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

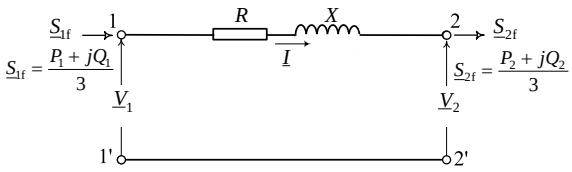
Пресметка на загуба на напон на вод



- Под поимот подразбираме дека се работи за меѓуфазен напон. Кога се работи за фазен напон, тогаш тоа посебно се нагласува. При тоа секогаш важи
$$\underline{U} = \sqrt{3} \cdot \underline{V}$$
- Разликата на комплексните напони $\Delta\underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$ се нарекува пад на напон во водот (вектор AB).
- Алгебарската разлика $\Delta U = U_1 - U_2$ на ефективните вредности на напоните се нарекува загуба на напонот во водот (отсечка AC).

Пресметка на загуба на напон на вод

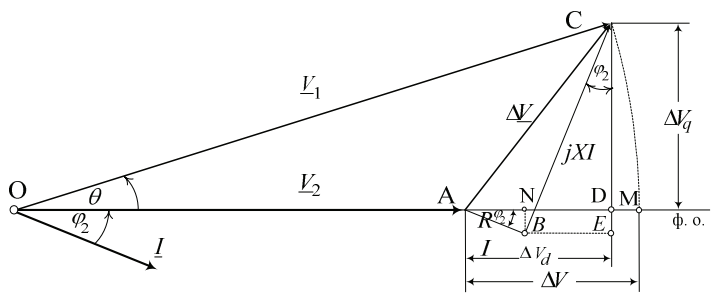
Случај со надземен вод за среден напон ($U_\mathrm{n} \leq 35\,\mathrm{kV}$)



- Фазните напони на двата краја од водот се V_1 и V_2
- Трифазните моќности на двата краја од водот се $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$ и $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$
- Нека се познати $\underline{V}_2$, $\underline{I}$ и φ_2, а треба да се определи напонот $\underline{V}_1$ и аголот θ меѓу векторите на фазните напони

Пресметка на загуба на напон на вод

- Падот на напон во водот $\Delta \underline{V} = \underline{Z} \cdot \underline{I}$ е даден со векторот $\overrightarrow{\mathrm{AC}}$
- Загубата на напон во водот е дадена со отсечката $\overline{\mathrm{AM}}$

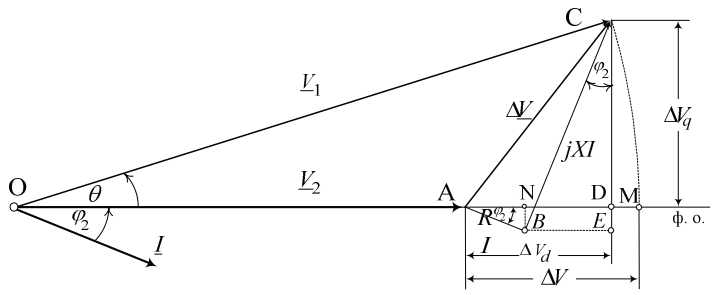


надолжна компонента на падот на фазниот напон

$$\overline{\mathrm{AD}} = \overline{\mathrm{AN}} + \overline{\mathrm{ND}} = \overline{\mathrm{AN}} + \overline{\mathrm{BE}}$$

$$\Delta V_d = RI\cos\varphi_2 + XI\sin\varphi_2$$

Пресметка на загуба на напон на вод



напречна (попречна) компонента на падот на фазниот напон

$$\overline{\mathrm{CD}} = \overline{\mathrm{CE}} - \overline{\mathrm{DE}} = \overline{\mathrm{CE}} - \overline{\mathrm{BN}}$$

$$\Delta V_q = XI\cos\varphi_2 - RI\sin\varphi_2.$$

Пресметка на загуба на напон на вод

$$\underline{V}_1 = V_2 + \Delta V_d + j\Delta V_q$$

Ако равенката ја помножиме со $\sqrt{3}$ за меѓуфазниот (линискиот) напон на почетокот на водот добиваме

$$\underline{U}_1 = U_2 + \Delta U_d + j\Delta U_q$$

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2},$$

$$U_1 = (U_2 + \Delta U_d) \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta U_q^2}{(U_2 + \Delta U_d)^2}}.$$

$$U_2 + \Delta U_d \gg \Delta U_q$$

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)},$$

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)}.$$

Пресметка на загуба на напон на вод

Кај реалните водови е

$$\Delta U_q < 0,05 \cdot U_\mathrm{n}.$$

$$\frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)} \approx \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_\mathrm{n}} < \frac{(0,05 \cdot U_\mathrm{n})^2}{2 \cdot U_\mathrm{n}} = 0,00125 \cdot U_\mathrm{n}.$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d.$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d = \sqrt{3} \cdot \Delta V_d = \sqrt{3} \cdot (R \cdot I \cdot \cos\varphi_2 + X \cdot I \cdot \sin\varphi_2).$$

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I, \quad S_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I,$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d = S_2 \cdot \frac{(R \cdot \cos\varphi_2 + X \cdot \sin\varphi_2)}{U_2} = \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2},$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d = S_1 \cdot \frac{(R \cdot \cos\varphi_1 + X \cdot \sin\varphi_1)}{U_1} = \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_1}.$$

$$U_1 \approx U_2 + \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2},$$

$$U_2 \approx U_1 - \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_1}.$$

Пресметка на загуба на напон на вод

- Во претходната постапка до решението дојдовме преку фазорскиот дијаграм. Тоа вклучува примена на геометрија, т.е. „графичко“ решавање на електрични кола.
- „Вистинскиот“ начин на решавање во денешно време е со примена на методите за решавање на електрични кола со помош на равенки без примена на никаква геометрија.

$$\underline{I} = \left(\frac{\underline{S}_2}{\sqrt{3}\,U_2}\right)^* = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3}\,U_2}$$

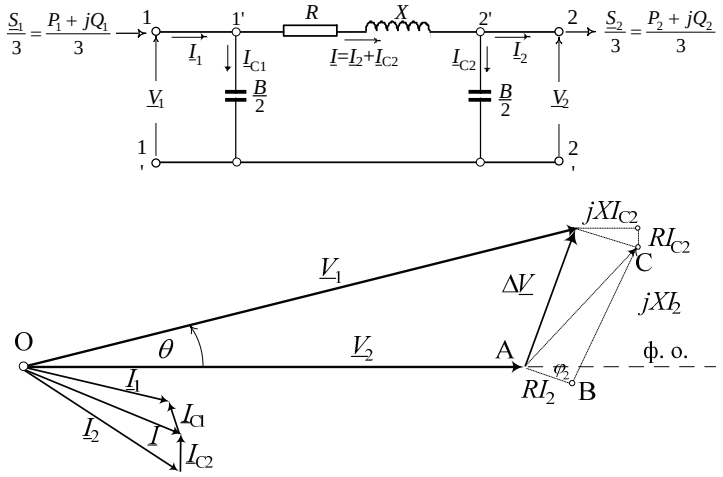
$$\underline{V}_1 = V_2 + \underline{Z} \cdot \underline{I} \qquad \sqrt{3} \cdot \underline{V}_1 = \sqrt{3} \cdot V_2 + \sqrt{3} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I} \qquad \underline{U}_1 = U_2 + \sqrt{3} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I}$$

$$\underline{U}_1 = U_2 + (R + jX) \cdot \frac{P_2 - jQ_2}{U_2} = U_2 + \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2} + j\frac{P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R}{U_2}$$

$$\Delta U_d = \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2} \qquad \Delta U_q = \frac{P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R}{U_2}$$

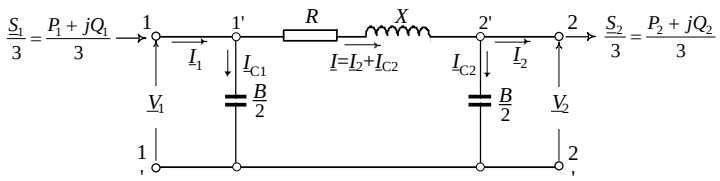
$$U_1 = \sqrt{(U_1 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2}$$

Високонапонски водови ($U_\mathrm{n} \geq 110\ \mathrm{kV}$)

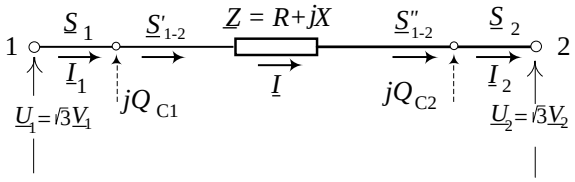


Нема да се обидеме графички да го решаваме проблемот преку фазорскиот дијаграм.

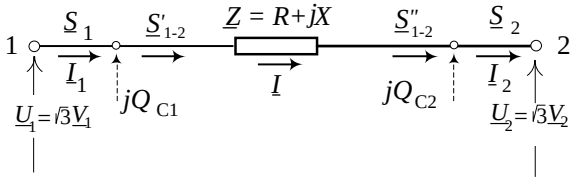
Високонапонски водови ($U_{\mathrm{n}} \geq 110\ \mathrm{kV}$)



$$\underline{I}_{\mathrm{C2}} = j(B/2) \cdot \underline{U}_2/\sqrt{3}$$
$$\underline{S}_{\mathrm{C2}} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}^*_{\mathrm{C2}} = -j(B/2) \cdot U_2^2 = -jQ_{C2}$$
$$\underline{S}_{\mathrm{C1}} = -j(B/2) \cdot U_1^2 = -jQ_{C1}$$



Високонапонски водови ($U_{\mathrm{n}} \geq 110\ \mathrm{kV}$)

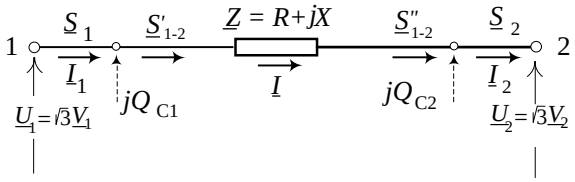


$$\underline{S}''_{1-2} = \underline{S}_2 - jQ_{\mathrm{C2}} = P_2 + j(Q_2 - Q_{\mathrm{C2}}).$$
$$S''_{1-2} = \sqrt{P_2^2 + (Q_2 - Q_{\mathrm{C2}})^2} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I$$
$$I^2 = \frac{S''^2_{1-2}}{3 \cdot U_2^2} = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{\mathrm{C2}})^2}{3 \cdot U_2^2}.$$

загуби на активна и реактивна моќност во редната гранка $\underline{Z} = R + jX$

$$\Delta P_Z = 3 \cdot R \cdot I^2 = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{U_2^2} \cdot R;$$
$$\Delta Q_Z = 3 \cdot X \cdot I^2 = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{\mathrm{C2}})^2}{U_2^2} \cdot X.$$

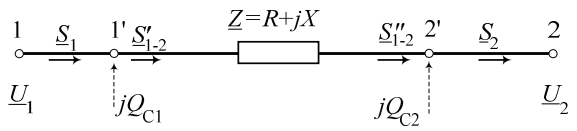
Високонапонски водови ($U_{\mathrm{n}} \geq 110\ \mathrm{kV}$)



$$\underline{S}'_{1-2} = \underline{S}''_{1-2} + \Delta P_Z + j\Delta Q_Z.$$
$$\underline{S}_1 = \underline{S}'_{1-2} - jQ_{\mathrm{C1}} = \underline{S}''_{1-2} + \Delta P_Z + j\Delta Q_Z - jQ_{\mathrm{C1}},$$
$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 - jQ_{\mathrm{C2}} + \Delta P_Z + j\Delta Q_Z - jQ_{\mathrm{C1}},$$

Пример 1

110 kV надземен вод со должина l = 50 km и познати параметри $R = r \cdot l$ = 6,45 Ω; $X = x \cdot l$ = 19,95 Ω и $B = b \cdot l$ = 142 μS на својот крај „2“ напојува потрошувач со моќност $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = (40 + j18)$ MVA при напон U_2 = 110 kV. Да се пресметаат приликите на неговиот почеток P_1, Q_1 и U_1. Пресметките да се направат без занемарување на погонската капацитивност на водот.



$$Q_{C2} = (B/2) \cdot U_2^2 = 71 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot 10^6 = 860.000 \text{ var} = 0,86 \text{ Mvar};$$
$$Q_2 - Q_{C2} = 17,14 \text{ Mvar}.$$

$$\underline{S}''_{1-2} = (P''_{1-2} + jQ''_{1-2}) = \underline{S}_2 - jQ_{C2} = (40 + j17,14) \text{ MVA},$$
$$P''_{1-2} = 40 \text{ MW}; \quad Q''_{1-2} = 17,14 \text{ Mvar}.$$

Пример 1

$$\Delta \underline{S}_Z = \Delta P_Z + j\Delta Q_Z = \frac{(P''_{1-2})^2 + (Q''_{1-2})^2}{U_2^2} \cdot (R + jX);$$
$$\Delta \underline{S}_Z = \frac{40^2 + 17,14^2}{110^2} \cdot (6,45 + j19,95) \text{ MVA},$$
$$\Delta P_Z = 1,009 \text{ MW}; \quad \Delta Q_Z = 3,122 \text{ Mvar}.$$

$$\Delta U_d = \frac{P''_{1-2} \cdot R + Q''_{1-2} \cdot X}{U_2} = \frac{40 \cdot 6,45 + 17,14 \cdot 19,95}{110} = 5,454 \text{ kV};$$
$$\Delta U_q = \frac{P''_{1-2} \cdot X - Q''_{1-2} \cdot R}{U_2} = \frac{40 \cdot 19,95 - 17,14 \cdot 6,45}{110} = 6,249 \text{ kV}.$$

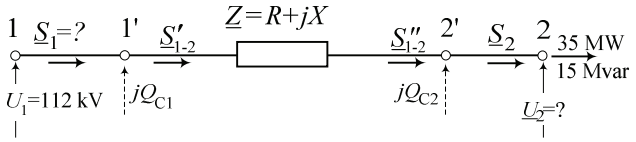
$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2} = \sqrt{(110 + 5,454)^2 + 6,249^2} = 115,623 \text{ kV}.$$
$$\theta = \text{arctg}\frac{\Delta U_q}{U_2 + \Delta U_d} = \text{arctg}\frac{6,249}{110 + 5,454} = 3,1^\circ.$$

Пример 1

$$Q_{C1} = \frac{B}{2} \cdot U_1^2 = 71 \cdot 10^{-6} \cdot 115,623^2 \cdot 10^6 = 0,949 \text{ Mvar}.$$
$$\Delta P = \Delta P_Z = 1 \text{ MW}; \quad \Delta Q = \Delta Q_Z - (Q_{C1} + Q_{C2}) = 1,314 \text{ Mvar}.$$
$$P_1 = P_2 + \Delta P = 41 \text{ MW}; \quad Q_1 = Q_2 + \Delta Q = 19,314 \text{ Mvar}.$$

Пример 2

Се посматра повторно истиот 110 kV надземен вод од примерот 1 но во друг режим. Познат е напонот на почетокот U_1 = 112 kV како и моќноста на потрошувачот на крајот од водот $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$ = (35 + j15) MVA. Да се пресмета напонот кај потрошувачот U_2 како и моќноста на неговиот почеток $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$.



- Во овој случај задачата не можеме да ја решиме директно со истата постапка како во примерот 1 бидејќи величините што треба да ги пресметаме зависат од непознатата U_2. Затоа овде ќе примениме итеративна постапка.
- Во секоја итерација процедурата на решавање ќе биде иста како и досега и ќе се базира на претпоставена вредност на непознатот напон U_2. Ќе започнеме со претпоставката $U_2 = U_\mathrm{n} = 110\,\mathrm{kV}$.

Пример 2

1) Прва итерација

$$Q_{\mathrm{C2}} = (B/2)\cdot U_2^2 = 71\cdot 10^{-6}\cdot 110^2\cdot 10^6 = 0,86\ \mathrm{Mvar};$$
$$Q_2 - Q_{\mathrm{C2}} = 14,14\ \mathrm{Mvar}.$$
$$\underline{S}''_{1-2} = \underline{S}_2 + jQ_{\mathrm{C2}} = (35 + j14,14)\ \mathrm{MVA}.$$
$$\Delta U_d = \frac{P''_{1-2}\cdot R + Q''_{1-2}\cdot X}{U_2} = \frac{35\cdot 6,45 + 14,14\cdot 19,95}{110}\cdot 10^3 = 4,617\ \mathrm{kV};$$
$$\Delta U_q = \frac{P''_{1-2}\cdot X - Q''_{1-2}\cdot R}{U_2} = \frac{35\cdot 19,95 - 14,14\cdot 6,45}{110}\cdot 10^3 = 5,519\ \mathrm{kV}.$$

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2} \;\Rightarrow\; U_2 = \sqrt{U_1{}^2 - \Delta U_q^2} - \Delta U_d;$$
$$U_2 = \sqrt{112^2 - 5,519^2} - 4,627 = 107,247\ \mathrm{kV}.$$

Пример 2

2) Втора итерација
со претходната вредност за U_2 = 107,247 kV пресметуваме

$$\Delta U_d = 4,743\ \mathrm{kV};\quad \Delta U_q = 5,658\ \mathrm{kV};\quad U_2 = 107,114\ \mathrm{kV}$$

После само уште две итерации се добива решение коешто може да се третира за „доволно точно“. Низата од решенија во итеративниот процес изгледа вака

1) итерација: $\Delta U_d = 4,617\ \mathrm{kV}$; $\Delta U_q = 5,519\ \mathrm{kV}$; $U_2 = 107,247\ \mathrm{kV}$
2) итерација: $\Delta U_d = 4,743\ \mathrm{kV}$; $\Delta U_q = 5,658\ \mathrm{kV}$; $U_2 = 107,114\ \mathrm{kV}$
3) итерација: $\Delta U_d = 4,750\ \mathrm{kV}$; $\Delta U_q = 5,664\ \mathrm{kV}$; $U_2 = 107,107\ \mathrm{kV}$
4) итерација: $\Delta U_d = 4,750\ \mathrm{kV}$; $\Delta U_q = 5,664\ \mathrm{kV}$; $U_2 = 107,107\ \mathrm{kV}$

$$U_2 = 107,107\ \mathrm{kV};\quad P_1 = 35,8\ \mathrm{MW};\quad Q_1 = 15,78\ \mathrm{Mvar};$$
$$\Delta P = 0,8\ \mathrm{MW};\quad \Delta Q = 0,78\ \mathrm{Mvar};$$

Пример 2 – аналитички израз

$$Q_{C2} = B/2 \cdot U_2^2$$
$$\Delta U_d = \frac{P_2 R + (Q_2 - Q_{C2}) X}{U_2}$$
$$\Delta U_q = \frac{P_2 X - (Q_2 - Q_{C2}) R}{U_2}$$

$$(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2 - U_1^2 = 0$$
$$\alpha U_2^4 + \beta U_2^2 + \gamma = 0$$

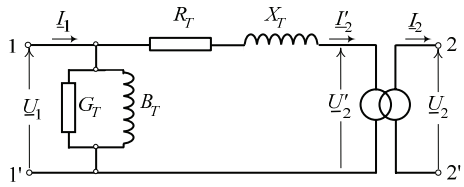
$$\alpha = B^2 \left(R^2 + X^2\right) - 4BX + 4$$
$$\beta = 8\left(P_2 R + Q_2 X\right) - 4U_1^2 - 4BQ_2\left(R^2 + X^2\right)$$
$$\gamma = 4\left(P_2^2 + Q_2^2\right)\left(R^2 + X^2\right)$$

Пример 2 – аналитички израз

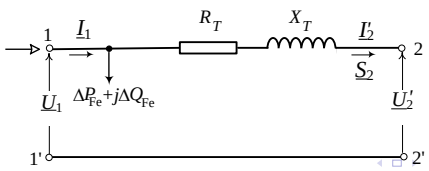
$$\alpha = B^2\left(R^2 + X^2\right) - 4BX + 4 =$$
$$= 142 \cdot 10^{-6} \cdot (6,45^2 + 19,95^2) - 4 \cdot 142 \cdot 10^{-6} \cdot 19,95 + 4 = 3,98868$$
$$\beta = 8\left(P_2 R + Q_2 X\right) - 4U_1^2 - 4BQ_2\left(R^2 + X^2\right) =$$
$$= 8 \cdot (35 \cdot 6,45 + 15 \cdot 19,95) - 4 \cdot 112^2 - 4 \cdot 142 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot \left(6,45^2 + 19,95^2\right) =$$
$$= -45.979,74543$$
$$\gamma = 4\left(P_2^2 + Q_2^2\right)\left(R^2 + X^2\right) = 4 \cdot \left(35^2 + 15^2\right) \cdot \left(6,45^2 + 19,95^2\right) = 2.549.709$$

$$D = \beta^2 - 4 \cdot \alpha \cdot \gamma = 2.073.457.125$$
$$x_1 = \frac{-\beta + \sqrt{D}}{2 \cdot \alpha} = 11.471,84503$$
$$x_2 = \frac{-\beta - \sqrt{D}}{2 \cdot \alpha} = 55,72222$$
$$U_2 = \sqrt{x_1} = 107,107\,\mathrm{kV}$$

Загуба на напон и загуба на моќност во трансформатори



- Со идеалниот трансформатор со познат преносен однос k_T вршиме сведување на напонот $\underline{U}_2$ и струјата $\underline{I}_2$.
- При пресметките од практични причини, идеалниот трансформатор не го прикажуваме во заменските шеми, но сепак правиме сведување на сите електрични величини на едно исто напонско ниво.



Загуба на напон и загуба на моќност во трансформатори

Загубата на напонот во трансформаторот ќе се определи по постапка која е аналогна на онаа што ја применуваме и кај водовите.

$$\Delta U_d = \sqrt{3} I_2'(R_T \cos\varphi_2 + X_T \sin\varphi_2) = \frac{S_2}{U_2'}(R_T \cos\varphi_2 + X_T \sin\varphi_2),$$

$$\Delta U_q = \sqrt{3} I_2'(X_T \cos\varphi_2 - R_T \sin\varphi_2) = \frac{S_2}{U_2'}(X_T \cos\varphi_2 - R_T \sin\varphi_2).$$

$$R_T = \frac{u_{ka}\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n}},$$

$$X_T = \frac{u_{k\sigma}\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n}},$$

$$\Delta U_d = \frac{S_2}{U_\mathrm{n}} \cdot \left(\frac{u_{ka}\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n}} \cdot \cos\varphi_2 + \frac{u_{k\sigma}\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n}} \cdot \sin\varphi_2 \right),$$

$$\Delta U_q = \frac{S_2}{U_\mathrm{n}} \cdot \left(\frac{u_{k\sigma}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_\mathrm{n}} \cdot \cos\varphi_2 - \frac{u_{ka}\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n}} \cdot \sin\varphi_2 \right),$$

Загуба на напон и загуба на моќност во трансформатори

$$\Delta U_d\% = \frac{S_2}{S_\mathrm{n}} \cdot (u_{ka}\% \cdot \cos\varphi_2 + u_{k\sigma}\% \cdot \sin\varphi_2),$$

$$\Delta U_q\% = \frac{S_2}{S_\mathrm{n}} \cdot (u_{k\sigma}\% \cdot \cos\varphi_2 - u_{ka}\% \cdot \sin\varphi_2).$$

Коефициент на оптоварување на трансформаторот

$$\alpha = \frac{S_2}{S_\mathrm{n}}$$

$$\Delta U_d\% = \alpha \cdot (u_{ka}\% \cdot \cos\varphi_2 + u_{k\sigma}\% \cdot \sin\varphi_2),$$

$$\Delta U_q\% = \alpha \cdot (u_{k\sigma}\% \cdot \cos\varphi_2 - u_{ka}\% \cdot \sin\varphi_2).$$

Загуба на напон и загуба на моќност во трансформатори

$$\Delta P_T = \Delta P_\mathrm{Fe} + 3 \cdot R_T \cdot (I_2')^2 = \Delta P_\mathrm{Fe} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{(U_2')^2} \cdot R_T,$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_\mathrm{Fe} + 3 \cdot X_T \cdot (I_2')^2 = \Delta Q_\mathrm{Fe} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{(U_2')^2} \cdot X_T.$$

Ако се земе дека е $U_2' \approx U_\mathrm{n}$ тогаш, со оглед на следните релации:

$$\Delta P_k \approx \Delta P_\mathrm{Cun} = R_T \cdot \frac{S_\mathrm{n}^2}{U_\mathrm{n}^2},$$

$$\Delta Q_\mathrm{Fe} = \frac{i_0\%}{100} S_\mathrm{n} \quad \text{и}$$

$$X_T \approx Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_\mathrm{n}^2}{S_\mathrm{n}},$$

можеме да пишуваме:

$$\Delta P_T = \Delta P_\mathrm{Fe} + \Delta P_\mathrm{Cun} \cdot \alpha^2; \quad \Delta Q_T = \frac{S_\mathrm{n}}{100} \cdot \left(i_0\% + u_k\% \cdot \alpha^2 \right).$$

Загуба на напон и загуба на моќност во трансформатори

n идентични паралелно врзани трансформатори

$$\Delta P_T = n \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2;$$
$$\Delta Q_T = \frac{S_{\mathrm{n}}}{100} \cdot \left(n \cdot i_0\% + \frac{1}{n} \cdot u_k\% \cdot \alpha^2 \right).$$

Пример 3

За дистрибутивниот трансформатор од примерот од глава 4

$$S_{\mathrm{n}} = 400\,\mathrm{kVA};\ U_{\mathrm{n}} = 10\,\mathrm{kV};\ k_T = k_{T\mathrm{n}} = 25;$$
$$u_k\% = 4\%;\ i_0\% = 2,1\%;\ \Delta P_{\mathrm{Cun}} = 4,6\,\mathrm{kW};\ \Delta P_{\mathrm{Fe}} = 0,63\,\mathrm{kW}.$$

да се пресмета загубата на напон и моќност за следниот работен режим:
$U_1 = 10,3\,\mathrm{kV}$; $S_2 = S_{\mathrm{n}} = 400\,\mathrm{kVA}$; $\cos\varphi = 0,8$ ($P_2 = 320\,\mathrm{kW}$; $Q_2 = 240\,\mathrm{kvar}$).

Параметрите на Г-заменската шема изнесуваат

$$\underline{Z}_T = (R_T + jX_T) = (2,875 + j9,58)\ \Omega;$$
$$\underline{Y}_T = (G_T + jB_T) = (9,3 - j83,5)\ \mu\mathrm{S}.$$

Пример 3

$$Z_{\mathrm{n}} = \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{\mathrm{S}_{\mathrm{n}}} = \frac{10^2}{0,4} = 250\,\Omega,$$
$$\alpha = \frac{S_2}{S_{\mathrm{n}}} = \frac{400}{400} = 1.$$

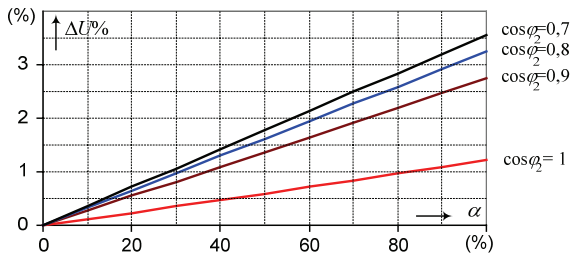
$$R_T = \frac{u_{ka}\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}} \Rightarrow u_{ka}\% = 100 \cdot \frac{R_T}{Z_{\mathrm{n}}} = 100 \cdot \frac{2,875}{250} = 1,15\%;$$
$$X_T = \frac{u_{k\sigma}\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}} \Rightarrow u_{k\sigma}\% = 100 \cdot \frac{X_T}{Z_{\mathrm{n}}} = 100 \cdot \frac{9,58}{250} = 3,83\%.$$

проверка

$$u_k\% = \sqrt{(u_{ka}\%)^2 + (u_{k\sigma}\%)^2} = \sqrt{1,15^2 + 3,83^2} = 4\%.$$

$$\Delta U_d\% = \alpha\,(u_{ka}\% \cos\varphi_2 + u_{k\sigma}\% \sin\varphi_2) = 1 \cdot (1,15 \cdot 0,8 + 3,83 \cdot 0,6) = 3,22\,\%;$$
$$\Delta U_q\% = \alpha\,(u_{k\sigma}\% \cos\varphi_2 - u_{ka}\% \sin\varphi_2) = 1 \cdot (3,83 \cdot 0,8 - 1,15 \cdot 0,6) = 2,37\,\%;$$
$$\Delta U\% = \Delta U_d\% + (\Delta U_q\%)^2/200 = 3,22^2 + 2,37^2/200 = 3,25\,\%.$$

Пример 3



Загуба на напон во трансформаторот во зависност од степенот на оптовареност α

$$\Delta P_T = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2 = 0,63 + 4,6 \cdot 1^2 = 5,23\,\mathrm{kW};$$

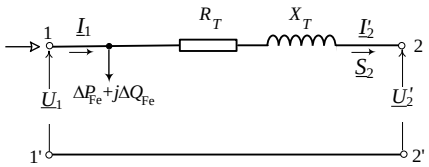
$$\Delta Q_T = S_{\mathrm{n}} \cdot \frac{\left(i_0\% + u_k\% \cdot \alpha^2\right)}{100} = 400 \cdot \frac{(2,1 + 4 \cdot 1^2)}{100} = 24,4\,\mathrm{kvar}.$$

Пример 3 – втор начин

$$U_1 = 10,3\,\mathrm{kV}; \quad P_2 = 320\,\mathrm{kW}; \quad Q_2 = 240\,\mathrm{kvar}$$

$$\underline{Z}_T = (R_T + jX_T) = (2,875 + j9,58)\ \Omega$$

$$\Delta P_{\mathrm{Fe}} = 0,63\,\mathrm{kW} \quad \Delta Q_{\mathrm{Fe}} = i_0\%/100 \cdot S_{\mathrm{n}} = 2,1/100 \cdot 400 = 8,4\,\mathrm{kvar}$$



$$\Delta U_d = \frac{P_2 \cdot R_T + Q_2 \cdot X_T}{U_2} = \frac{0,32 \cdot 2,875 + 0,24 \cdot 9,58}{10} = 0,322\,\mathrm{kV} = 3,22\%$$

$$\Delta U_q = \frac{P_2 \cdot X_T - Q_2 \cdot R_T}{U_2} = \frac{0,32 \cdot 9,58 - 0,24 \cdot 2,875}{10} = 0,238\,\mathrm{kV} = 2,38\%$$

Пример 3 – втор начин

$$\Delta P_Z = R_T \cdot \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} = 2,875 \cdot \frac{0,32^2 + 0,24^2}{10^2} = 0,0046\,\mathrm{MW}$$

$$\Delta P_Z = 4,6\,\mathrm{kW}$$

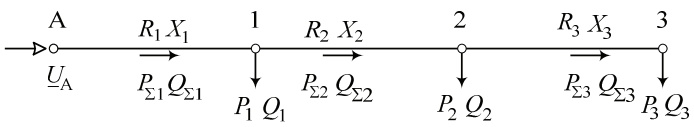
$$\Delta Q_Z = X_T \cdot \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} = 9,58 \cdot \frac{0,32^2 + 0,24^2}{10^2} = 0,0153\,\mathrm{Mvar}$$

$$\Delta Q_Z = 15,3\,\mathrm{kvar}$$

$$\Delta P_T = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_Z = 0,63 + 4,6 = 5,23\,\mathrm{kW}$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{\mathrm{Fe}} + \Delta Q_Z = 8,4 + 15,3 = 23,7\,\mathrm{kvar}$$

Неразгранета мрежа

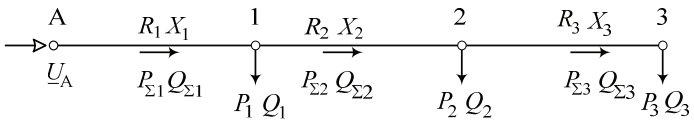


Магистрален вод

$$P_{\Sigma3} = P_3, \qquad Q_{\Sigma3} = Q_3;$$
$$P_{\Sigma2} = P_2 + P_3, \qquad Q_{\Sigma2} = Q_2 + Q_3;$$
$$P_{\Sigma1} = P_1 + P_2 + P_3, \qquad Q_{\Sigma1} = Q_1 + Q_2 + Q_3;$$

$$P_{\Sigma k} = \sum_{i=k}^{3} P_i; \quad Q_{\Sigma k} = \sum_{i=k}^{3} Q_i; \quad k = 1, 2, 3.$$

Неразгранета мрежа

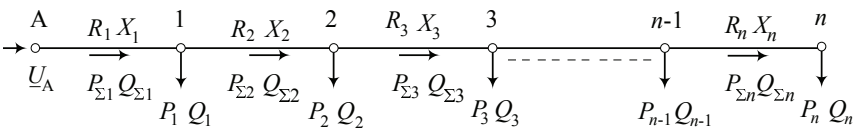


Магистрален вод

$$\Delta U \equiv \Delta U_{A-3} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3};$$
$$\Delta U = \frac{P_{\Sigma1} R_1 + Q_{\Sigma1} X_1}{U_1} + \frac{P_{\Sigma2} R_2 + Q_{\Sigma2} X_2}{U_2} + \frac{P_{\Sigma3} R_3 + Q_{\Sigma3} X_3}{U_3};$$
$$\Delta U = \sum_{i=1}^{3} \frac{P_{\Sigma i} R_i + Q_{\Sigma i} X_i}{U_i}.$$

$$\Delta U \approx \sum_{i=1}^{3} \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^{3} (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i).$$

Неразгранета мрежа



Магистрален вод со произволен број потрошувачи

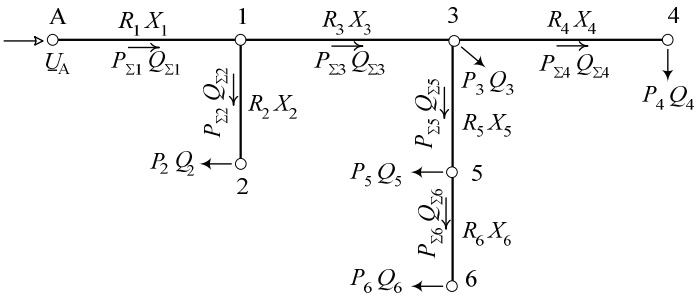
$$\Delta U = U_A - U_n \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i).$$

$$\Delta U_{A-k} \approx \sum_{i=1}^{k} \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^{k} (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i).$$

Ако магистралниот вод е со ист пресек по целата своја должина

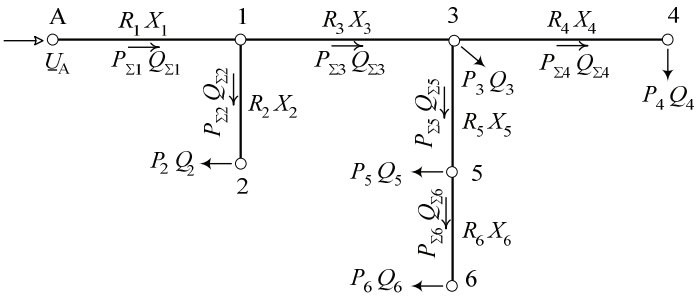
$$\Delta U_{A-k} \approx \sum_{i=1}^{k} \frac{P_{\Sigma i} R_i + Q_{\Sigma i} X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \left(r \sum_{i=1}^{k} P_{\Sigma i} l_i + x \cdot \sum_{i=1}^{k} Q_{\Sigma i} \cdot l_i \right)$$

Разгранета мрежа



$$U_6 = U_A - (\Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-3} + \Delta U_{3-5} + \Delta U_{5-6});$$
$$U_6 = U_A - (\Delta U_1 + \Delta U_3 + \Delta U_5 + \Delta U_6).$$

Разгранета мрежа



делница A-1: $P_{\Sigma 1} = P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6;$ $\quad Q_{\Sigma 1} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$

делница 1-2: $P_{\Sigma 2} = P_2;$ $\quad Q_{\Sigma 2} = Q_2,$

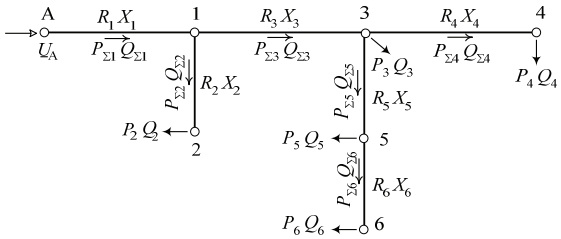
делница 1-3: $P_{\Sigma 3} = P_3 + P_4 + P_5 + P_6;$ $\quad Q_{\Sigma 3} = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$

делница 3-4: $P_{\Sigma 4} = P_4;$ $\quad Q_{\Sigma 4} = Q_4,$

делница 3-5: $P_{\Sigma 5} = P_5 + P_6;$ $\quad Q_{\Sigma 5} = Q_5 + Q_6,$

делница 5-6: $P_{\Sigma 6} = P_6;$ $\quad Q_{\Sigma 6} = Q_6.$

Разгранета мрежа

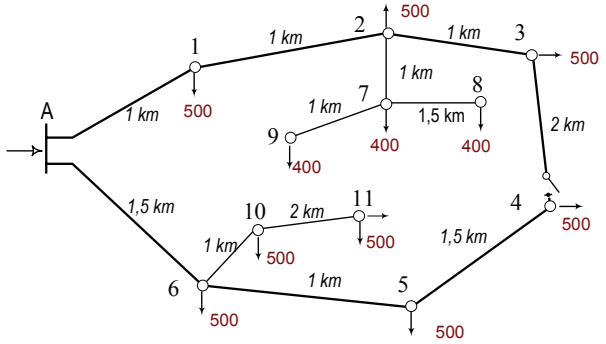


$$U_6 \approx U_A - \Delta U_1 - \Delta U_3 - \Delta U_5 - \Delta U_6 =$$
$$= U_A - \frac{(P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1)}{U_n} - \frac{(P_{\Sigma 3} \cdot R_3 + Q_{\Sigma 3} \cdot X_3)}{U_n} -$$
$$- \frac{(P_{\Sigma 5} \cdot R_5 + Q_{\Sigma 5} \cdot X_5)}{U_n} - \frac{(P_{\Sigma 6} \cdot R_6 + Q_{\Sigma 6} \cdot X_6)}{U_n}.$$

Аналогно се постапува и при пресметувањето на напонот во било која друга точка од мрежата. Загубата на напон во мрежата е разликата на ефективните вредности на напонот во точката A и напонот на точката од мрежата која има најмал напон.

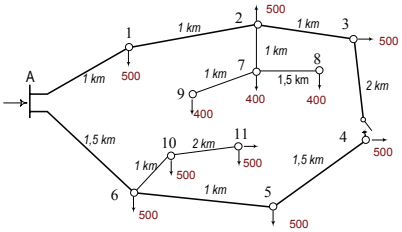
Пример 4

На сликата се прикажани два полупрстена од една 10 kV кабелска градска мрежа. Тие напојуваат вкупно $n = 11$ трансформаторски станици 10/0,4 kV со идентични параметри. Познати се нивните оптоварувања на среднонапонската страна и тие, изразени во kW, се прикажани на самата слика. Факторот на моќност на сите потрошувачи е еднаков и изнесува $\cos\varphi = 0,9$. Напонот во напојниот јазел изнесува U_{A} = 10,3 kV. Сите секции од мрежата се кабли од типот XHE 49 A 3×1×150, 6/10 kV за коишто е позната надолжната импеданција $\underline{z}_1 = (0,208 + j0,092)\ \Omega/\mathrm{km}$.



За прикажаниот режим на работа да се пресметаат приближните вредности на моќностите во гранките и напоните во јазлите од мрежата.

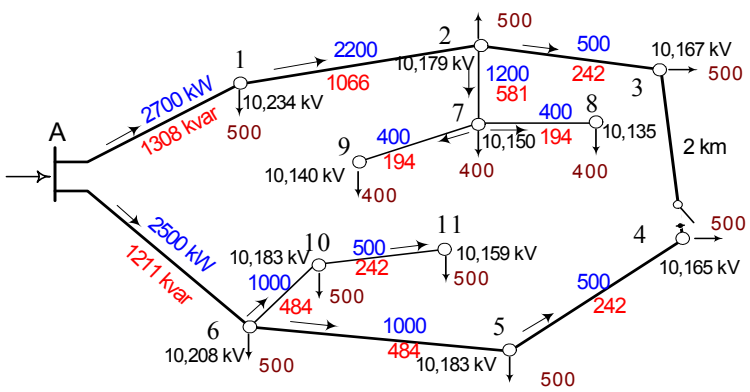
Пример 4 – текови на моќности



$$P_{\Sigma 1} = P_1 + P_2 + P_3 + P_7 + P_8 + P_9;$$
$$P_{\Sigma 1} = 500 + 500 + 500 + 400 + 400 + 400 = 2700\ \mathrm{kW};$$
$$Q_{\Sigma 1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_7 + Q_8 + Q_9;$$
$$Q_{\Sigma 1} = 242 + 242 + 242 + 194 + 194 + 194 = 1308\ \mathrm{kvar}.$$

$$P_{\Sigma 2} = P_2 + P_3 + P_7 + P_8 + P_9 = 500 + 500 + 400 + 400 + 400 = 2200\ \mathrm{kW},$$
$$Q_{\Sigma 2} = Q_2 + Q_3 + Q_7 + Q_8 + Q_9 = 242 + 242 + 194 + 194 + 194 = 1066\ \mathrm{kvar},$$
$$P_{\Sigma 2} = P_{\Sigma 1} - P_1 = 2700 - 500 = 2200\ \mathrm{kW},$$
$$Q_{\Sigma 2} = Q_{\Sigma 1} - Q_1 = 1308 - 242 = 1066\ \mathrm{kvar}.$$

Пример 4 – текови на моќности



Пример 4 – напони

$$\Delta U_1 = \frac{P_{\Sigma 1} R_1 + Q_{\Sigma 1} X_1}{U_{\mathrm{A}}} = \frac{2700 \cdot 0,208 + 1308 \cdot 0,092}{10,3} = 0,066\,\mathrm{kV};$$

$$U_1 = U_{\mathrm{A}} - \Delta U_1 = 10,3 - 0,066 = 10,234\,\mathrm{kV}.$$

$$\Delta U_2 = \frac{P_{\Sigma 2} R_2 + Q_{\Sigma 2} X_2}{U_1} = \frac{2200 \cdot 0,208 + 1066 \cdot 0,092}{10,234} = 0,054\,\mathrm{kV};$$

$$U_2 = U_1 - \Delta U_2 = 10,234 - 0,054 = 10,180\,\mathrm{kV}.$$

Пример 4 – резултати

Делница	$P_{\Sigma i}$ (kW)	$Q_{\Sigma i}$ (kvar)	ΔU_i (kV)	U_i (kV)	ΔP_i (kW)	ΔQ_i (kvar)
A – 1	2700	1308	0,066	10,234	17,876	7,907
1 – 2	2200	1066	0,054	10,180	11,996	5,306
2 – 3	500	242	0,012	10,167	0,621	0,275
3 – 4	0	0	0	10,167	0	0
2 – 7	1200	581	0,030	10,150	3,598	1,591
7 – 8	400	194	0,015	10,135	0,603	0,267
7 – 9	400	194	0,010	10,140	0,401	0,177
A – 6	2500	1211	0,092	10,208	23,104	10,219
6 – 5	1000	484	0,025	10,183	2,476	1,095
5 – 4	500	242	0,019	10,165	0,932	0,412
6 – 10	1000	484	0,025	10,183	2,476	1,095
10 – 11	500	242	0,025	10,158	1,244	0,550

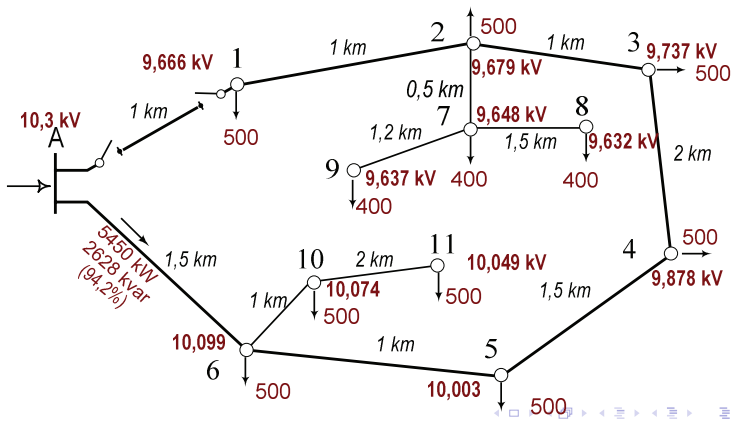
Загубата на напон во мрежата е разлика на ефективните вредности на напонот во точката А и напонот во точката со најнизок напон (точка бр. 8).

$$\Delta U = U_{\mathrm{A}} - U_8 = 10,3 - 10,135 = 0,165\,\mathrm{kV}\ (1,65\%).$$

$$\Delta P_{\Sigma} = 65,85\,\mathrm{kW}$$

Пример 5

За мрежата од примерот 4 да се утврди колкави ќе бидат загубите на напон и моќност за најнеповолниот режим на работа, кога е испадната секцијата „А-1“. Дали таквиот режим е прифатлив од аспект на загуба на напон во мрежата и од аспект на термичко оптоварување на секцијата „А-6“ како најоптоварена. Дозволените загуби на напон во хавариски режими изнесува ΔU_{doz} = 10%, додека најголемото дозволено струјно оптоварување на кабелот изнесува I_{d} = 360 A.

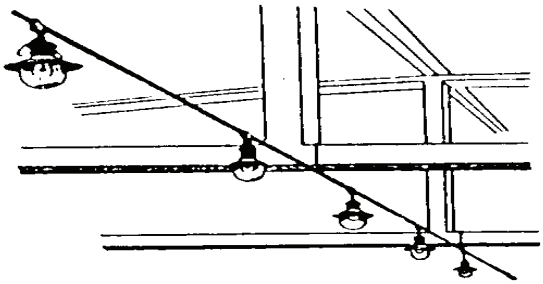


Пример 5 – резултати

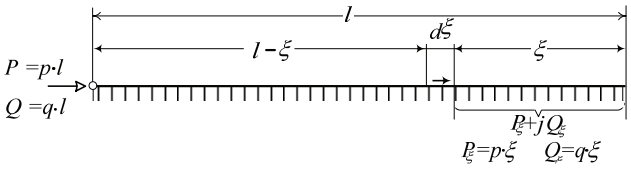
- привидна моќност во првата, најоптоварена делница „А-6“: $(5,45 + j2,63)$ MVA;
- струја во најоптоварената делница I_{A-6} = 339 A (94,2% од дозволената I_{d});
- вкупни загуби на моќност во мрежата $\Delta \underline{S}_{\Sigma} = (250 + j110)$ kVA;
- загуба на напон во мрежата: $\Delta U = U_A - U_8 = 10,3 - 9,632 = 0,668$ kV (6,8%).

Мрежа со континуирано оптоварување

- Во некои случаи, на пример при проектирањето на мрежа на надворешно осветление на град, село, фабричка хала и слично, оптоварувањата на водовите се претставуваат рамномерно распределени по нивната должина.
- Така се постапува бидејќи доколку во пресметките би се зела предвид секоја светилка одделно, тогаш пресметувањето би било премногу комплицирано, а надомест за тоа би било малото зголемување на точноста на резултатите.



Мрежа со континуирано оптоварување

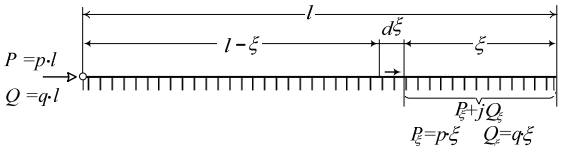


$$d(\Delta U) = \frac{P_\xi \cdot r \cdot d\xi}{U_{\mathrm{n}}} + \frac{Q_\xi \cdot x \cdot d\xi}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{(p \cdot \xi) \cdot r \cdot d\xi}{U_{\mathrm{n}}} + \frac{(q \cdot \xi) \cdot x \cdot d\xi}{U_{\mathrm{n}}},$$

$$\Delta U = \int_0^l d(\Delta U) = \frac{p \cdot r}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \int_0^l \xi \cdot d\xi + \frac{q \cdot x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \int_0^l \xi \cdot d\xi = \frac{p \cdot r \cdot l^2}{2\,U_{\mathrm{n}}} + \frac{q \cdot x \cdot l^2}{2\,U_{\mathrm{n}}}.$$

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_{\mathrm{n}}}.$$

Мрежа со континуирано оптоварување



$$d(\Delta P) = 3 \cdot r \cdot d\xi \cdot I_\xi^2 = r \cdot d\xi \cdot \frac{P_\xi^2 + Q_\xi^2}{U_\mathrm{n}^2} =$$

$$= r \cdot d\xi \cdot \frac{p^2 \cdot \xi^2 + q^2 \cdot \xi^2}{U_\mathrm{n}^2} = \frac{p^2 + q^2}{U_\mathrm{n}^2} \cdot r \cdot \xi^2 \cdot d\xi,$$

$$\Delta P = \int_0^l d(\Delta P) = \frac{p^2 + q^2}{U_\mathrm{n}^2} \cdot r \cdot \int_0^l \xi^2 \cdot d\xi = \frac{p^2 + q^2}{U_\mathrm{n}^2} \cdot r \cdot \frac{l^3}{3},$$

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_\mathrm{n}^2} \cdot R = \frac{1}{3} \cdot \Delta P_{\text{конц}}.$$

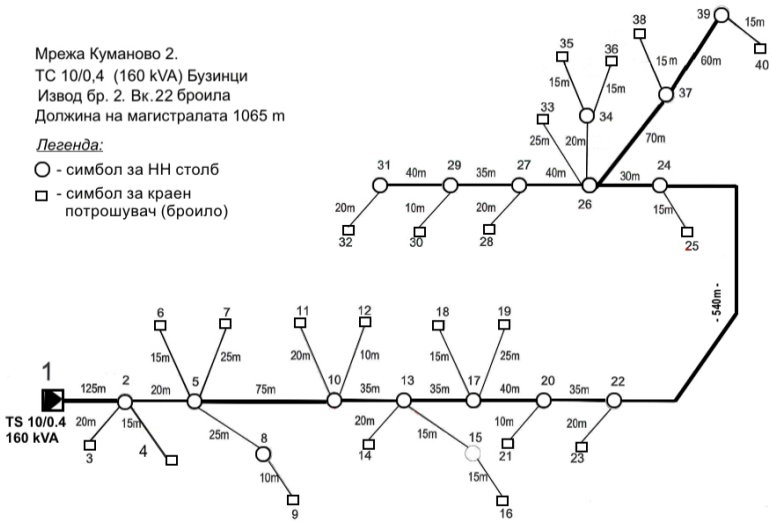
$$\Delta Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_\mathrm{n}^2} \cdot X = \frac{1}{3} \cdot \Delta Q_{\text{конц}}.$$

Пример 6

На сликата е прикажан надземен извод од една НН дистрибутивна мрежа. Изводот напојува вкупно 22 индивидуални потрошувачи (селски домаќинства). Главната магистрала на мрежата, долга $l = 1065\ \mathrm{m}$, е изведена со спроводници Al 35 mm^2 за коишто е позната импеданцијата по единица должина $\underline{z} = (0,90 + j0,35)\ \Omega/\mathrm{km}$, додека приклучните водови до поедините потрошувачи се изведени со самоносечки кабли (СКС) 4×16 Al со подолжна импеданција $\underline{z}_1 = (2,0 + j0,10)\ \Omega/\mathrm{km}$, кои со оглед на своите релативно мали должини може да се испуштат од анализите.

Со помош на моделот за вод со континуирано распределен товар да се процени загубата на напон и загубите на моќност во мрежата. Потоа, со детални пресметки да се добие уточнетата вредност за овие загуби и да се оцени големината на грешката што ја дава идеализираниот модел на магистралниот вод. Просечната моќност по едно домаќинство во режимот на максималното оптоварување изнесува $P_1 = 2\ \mathrm{kW}$ при фактор на моќност $\cos\varphi = 0,95\ (Q_1 = P_1 \cdot \mathrm{tg}\varphi = 0,657\ \mathrm{kvar})$.

Пример 6



Пример 6

$$\underline{Z} = (R + jX) = \underline{z} \cdot l = (0,90 + j0,35) \cdot 1,065 = (0,969 + j0,373)\ \Omega.$$

$$P_\Sigma = n \cdot P_1 = 22 \cdot 2 = 44\ \text{kW};$$
$$Q_\Sigma = n \cdot Q_1 = 22 \cdot 0,657 = 14,5\ \text{kvar}.$$

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_\Sigma \cdot R + Q_\Sigma \cdot X}{U_\text{n}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{44 \cdot 0,969 + 14,5 \cdot 0,373}{0,4} = 60\ \text{V};$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_\text{n}} \cdot 100 = \frac{60}{400} \cdot 100 = 15\%.$$

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{{P_\Sigma}^2 \cdot R}{U_\text{n}^2 \cdot \cos^2\varphi} = \frac{1}{3} \cdot \frac{44^2 \cdot 0,969}{0,4^2 \cdot 0,95^2} = 4431\ \text{W} = 4,431\ \text{kW};$$

$$\Delta P\% = \frac{4,431}{44} \cdot 100 = 9,8\%.$$

$$\Delta Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{{P_\Sigma}^2 \cdot X}{U_\text{n}^2 \cdot \cos^2\varphi} = \frac{1}{3} \cdot \frac{44^2 \cdot 0,373}{0,4^2 \cdot 0,95^2} = 1667\ \text{var} = 1,667\ \text{kvar};$$

$$\Delta Q\% = \frac{1,667}{14,5} \cdot 100 = 11,5\%.$$

Пример 6

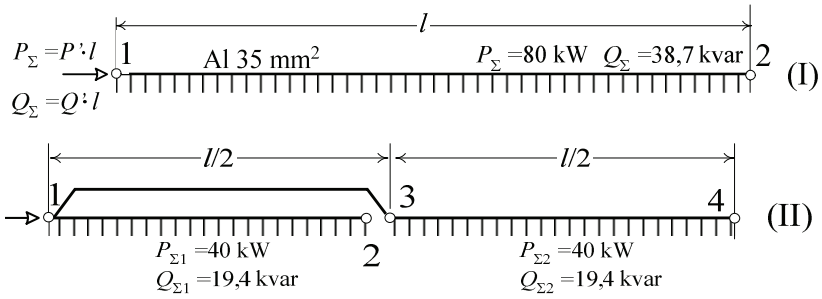
Со детално моделирање на изводот, со вистинските должини на неговите делници и со вистинската просторна распределба на потрошувачите со помош на програмата LFZ.xls при $U_1 = 420$ V се добива

$$\Delta U = 63,6\ \text{V};\ (\Delta U\% = 15,9\%).$$
$$\Delta P = 4,61\ \text{kW};\ (\Delta P\% = 10,5\%).$$
$$\Delta Q = 1,79\ \text{kvar};\ (\Delta Q\% = 12,3\%).$$

Со релациите за вод со континуиран товар се добиваат доста добри проценки на загубите на напон и моќност во НН дистрибутивни мрежи. Затоа тие често се користат за брзи проценки на загубите во мрежата.

Пример 7

НН надземен извод со должина l = 300 m и спроводници од E-Al јаже со пресек 35 mm^2, со $\underline{z} = (0,90 + j0,33)\ \Omega/\text{km}$, напојува група потрошувачи со вкупна моќност во режимот на максимално оптоварување $P_\Sigma = 80$ kW; $\cos\varphi = 0,9$. Потрошувачите може да се третираат како рамномерно распределен товар. Поради големата должина на изводот и растот на конзумот, загубите на напон и моќност во мрежата се веќе неприфатливо високи. Се размислува за негово појачување на тој начин што до средината на изводот, на истите столбови, ќе се пушти уште една делница со ист пресек како и постојниот вод којашто ќе ја напојува втората половина од изводот.



Да се пресмета колку пати ќе се намалат загубите ΔU и ΔP, т.е. колкав ќе биде односот $\Delta U_{(\text{II})}/\Delta U_{(\text{I})}$ и $\Delta P_{(\text{II})}/\Delta P_{(\text{I})}$ помеѓу загубите после и пред реконструкцијата на изводот.

Пример 7 – постојна состојба

$$R = r \cdot l = 0,9 \cdot 0,3 = 0,27\,\Omega;$$
$$X = x \cdot l = 0,33 \cdot 0,3 = 0,1\,\Omega;$$
$$P_\Sigma = 80\,\mathrm{kW}; \quad Q_\Sigma = P_\Sigma \cdot \mathrm{tg}\varphi = 38,7\,\mathrm{kvar};$$
$$\Delta U_{(\mathrm{I})} = (U_1 - U_2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_\Sigma \cdot R + Q_\Sigma \cdot X}{U_\mathrm{n}} = 32\,\mathrm{V};$$
$$\Delta P_{(\mathrm{I})} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_\Sigma^2 \cdot R}{U_\mathrm{n}^2 \cdot \cos^2\varphi} = 4,44\,\mathrm{kW}.$$

Пример 7– нова состојба

$$\Delta U_{(\mathrm{II})} = (U_1 - U_3) + (U_3 - U_4) = \Delta U_{1-3} + \Delta U_{3-4};$$
$$\Delta U_{1-3} = \frac{1}{U_\mathrm{n}} \cdot \left(\frac{P_\Sigma}{2} \cdot \frac{R}{2} + \frac{Q_\Sigma}{2} \cdot \frac{X}{2}\right) = \frac{1}{2} \cdot \Delta U_{(\mathrm{I})};$$
$$\Delta U_{3-4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{U_\mathrm{n}} \cdot \left(\frac{P_\Sigma}{2} \cdot \frac{R}{2} + \frac{Q_\Sigma}{2} \cdot \frac{X}{2}\right) = \frac{1}{4} \cdot \Delta U_{(\mathrm{I})};$$
$$\Delta U_{(\mathrm{II})} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4}\right) \cdot \Delta U_{(\mathrm{I})} = \frac{3}{4} \cdot \Delta U_{(\mathrm{I})};$$
$$\frac{\Delta U_{(\mathrm{II})}}{\Delta \mathrm{U}_{(\mathrm{I})}} = \frac{3}{4} = 0,75;$$

Пример 7– нова состојба

$$\Delta P_{(\mathrm{II})} = \Delta P_{1-2} + \Delta P_{1-3} + \Delta P_{3-4};$$
$$\Delta P_{1-2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{(R/2)}{U_\mathrm{n}^2} \left(\frac{P_\Sigma/2}{\cos\varphi}\right)^2 = \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{P_\Sigma^2 \cdot R}{U_\mathrm{n}^2 \cdot \cos^2\varphi} = \frac{1}{8} \cdot \Delta P_{(\mathrm{I})};$$
$$\Delta P_{1-3} = \frac{(R/2)}{U_\mathrm{n}^2} \left(\frac{P_\Sigma/2}{\cos\varphi}\right)^2 = \frac{1}{8} \cdot \frac{P_\Sigma^2 \cdot R}{U_\mathrm{n}^2 \cdot \cos^2\varphi} = \frac{3}{8} \cdot \Delta P_{(\mathrm{I})};$$
$$\Delta P_{3-4} = \Delta P_{1-2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{(R/2)}{U_\mathrm{n}^2} \left(\frac{P_\Sigma/2}{\cos\varphi}\right)^2 = \frac{1}{8} \cdot \Delta P_{(\mathrm{I})};$$
$$\Delta P_{(\mathrm{II})} = \left(\frac{1}{8} + \frac{3}{8} + \frac{1}{8}\right) \cdot \Delta P_{(\mathrm{I})} = \frac{5}{8} \cdot \Delta P_{(\mathrm{I})} = 0,625 \cdot \Delta P_{(\mathrm{I})};$$
$$\frac{\Delta P_{(\mathrm{II})}}{\Delta \mathrm{P}_{(\mathrm{I})}} = \frac{5}{8} = 0,625.$$

Пример 7 – резултати

$$\Delta U_{(\mathrm{II})} = 0,75 \cdot \Delta U_{(\mathrm{I})} = 0,75 \cdot 32 = 24\,\mathrm{V}\ (6\%);$$
$$\Delta P_{(\mathrm{II})} = 0,625 \cdot \Delta \mathrm{P}_{(\mathrm{I})} = 2,78\,\mathrm{kW}.$$

Со секционирањето на постојниот вод на половина и со изградбата на новата делница, загубата на напон ќе се намали за 25% додека загубата на моќност (и на енергија) ќе се намали за 37,5%.

Забелешка: Резултатите добиени за односите $\Delta U_{(II)}/\Delta U_{(I)}$ и $\Delta P_{(II)}/\Delta P_{(I)}$ се општи и не зависат ниту од параметрите на мрежата (должина, пресек и сл.) ниту пак од оптоварувањето. Тоа значи дека со ваков зафат во една мрежа со конфигурација слична на онаа од сликата секогаш ќе се добива истото релативно намалување на загубите ΔU и ΔP.

Електрични мрежи

Пресметка на јамкасти и сложено-затворени мрежи

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

Општо за пресметката на сложено - затворените мрежи (1)

- Во затворените мрежи најголемиот дел од потрошувачите имаат двострано па и повеќестрано напојување коешто обезбедува висок степен на сигурност во напојувањето.
- Повеќето од јазлите во преносните мрежи се потрошувачки. Кај нив се познати инјектираната активна и реактивна моќност и тие спаѓаат во категоријата PQ јазли.
- Некои од јазлите се генераторски јазли. Тие можат да бидат или од категоријата PQ јазли или од категоријата PU јазли.
- Во секоја мрежа постои и балансен јазел. Тоа е генераторски јазел во којшто е приклучена голема електрана која има задача да го исполни билансот на моќности во системот (разликата помеѓу сумарната потрошувачка на моќност плус загубите и генерираните моќности од преостанатите електрани во ЕЕС).

Општо за пресметката на сложено - затворените мрежи (2)

- Една од основните задачи на анализата на ЕЕС е определувањето на режимските параметри на набљудуваниот режим: моќностите во гранките и напоните (по модул и аргумент) во јазлите од системот.
- Математички гледано решавањето на состојбата во една мрежа се сведува на решавање нелинеарен систем комплексни равенки.
- Потрошувачите во овие анализи може да се моделираат на неколку различни начини: а) преку нивните струи; б) преку нивните комплексни моќности коишто се сметаат за независни од напоните и в) со помош на константни импеданции. Тука ќе се применува моделот на константна моќност.

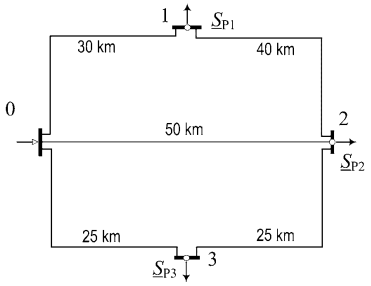
Метод на јазлови потенцијали

$$\underline{\boldsymbol{Y}} \times \underline{\boldsymbol{V}} = \underline{\boldsymbol{J}}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \cdots & \underline{Y}_{1n} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \cdots & \underline{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{n1} & \underline{Y}_{n2} & \cdots & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \vdots \\ \underline{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{J}_1 \\ \underline{J}_2 \\ \vdots \\ \underline{J}_n \end{bmatrix}$$

- Доколку во проблемот е позната десната страна од системот равенки ($\underline{J}_i$; $i = 1, 2, \ldots n$) тогаш проблемот се решава директно, без итерации.
- Но најчесто проблемот на е поставен поинаку и вообичаено се познати инјектираните комплексни моќности во јазлите $\underline{\boldsymbol{S}}_{\mathbf{p}}$ така што струите зависат од непознатите напони на јазлите $\underline{\boldsymbol{V}}$. Во тој случај проблемот се решава итеративно.

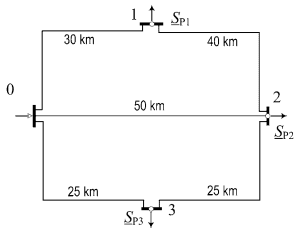
Метод на јазлови потенцијали – пример



- Сите водови во мрежата имаат $\underline{z} = r + jx = (0,129 + j0,40)\Omega/\mathrm{km}$; $\underline{y} \approx 0$. Нивните должини се прикажани на сликата.
- Познат е $U_0 = 112\,\mathrm{kV}(V_0 = U_0/\sqrt{3})$ како и струјните инјекции во одделните јазли од мрежата со помош на коишто се моделираат нејзините потрошувачи.

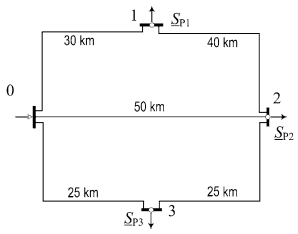
$$\underline{J}_1 = -(157,5 - j52,5)\ \mathrm{A} = -166,02 \cdot e^{-18,44^\circ}\ \mathrm{A};$$
$$\underline{J}_2 = -(105 - j52,5)\ \mathrm{A} = -117,39 \cdot e^{-26,57^\circ}\ \mathrm{A};$$
$$\underline{J}_3 = -(52,5 - j52,5)\ \mathrm{A} = -74,25 \cdot e^{-45^\circ}\ \mathrm{A}.$$

Метод на јазлови потенцијали – пример



$$\underline{Z}_{0-1} = (0,129 + j0,40) \cdot 30 = (3,858 + j12)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{0-2} = (0,129 + j0,40) \cdot 50 = (6,430 + j20)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{0-3} = (0,129 + j0,40) \cdot 25 = (3,215 + j10)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{1-2} = (0,129 + j0,40) \cdot 40 = (5,144 + j16)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{2-3} = (0,129 + j0,40) \cdot 25 = (3,215 + j10)\ \Omega.$$

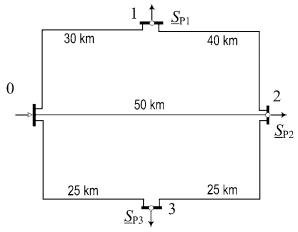
Метод на јазлови потенцијали – пример



$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{00} & \underline{Y}_{01} & \underline{Y}_{02} & \underline{Y}_{03} \\ \underline{Y}_{10} & \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{20} & \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} \\ \underline{Y}_{30} & \underline{Y}_{31} & \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{V}_0 \\ \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{J}_0 \\ \underline{J}_1 \\ \underline{J}_2 \\ \underline{J}_3 \end{bmatrix}.$$

- дијагоналниот елемент во редицата i е еднаков на сумата на адмитанциите на сите гранки кои го содржат јазелот i;
- вондијагоналниот елемент во редицата i и колоната j е еднаков на негативната сума на адмитанциите на сите гранки кои едновремено ги содржат јазлите i и j

Метод на јазлови потенцијали – пример



$$\underline{Y}_{00} = \frac{1}{\underline{Z}_{0-1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{0-2}} + \frac{1}{\underline{Z}_{0-3}} = (0,0682 - j0,2114)\ \mathrm{S};$$

$$\underline{Y}_{01} = -\frac{1}{\underline{Z}_{0-1}} = (-0,0243 + j0,0755)\ \mathrm{S}; \quad \underline{Y}_{10} = \underline{Y}_{01}.$$

$$\underline{\boldsymbol{Y}} = \begin{bmatrix} 0,068 - j0,211 & -0,024 + j0,076 & -0,015 + j0,045 & -0,029 + j0,091 \\ -0,024 + j0,076 & 0,043 - j0,132 & -0,018 + j0,057 & 0 \\ -0,015 + j0,045 & -0,018 + j0,057 & 0,062 - j0,193 & -0,029 + j0,091 \\ -0,029 + j0,091 & 0 & -0,029 + j0,091 & 0,058 - j0,181 \end{bmatrix} \mathrm{S}$$

Метод на јазлови потенцијали – пример

Бидејќи напонот $U_0 = \sqrt{3} \cdot V_0 = 112\,\mathrm{kV}$ во јазелот 0 е познат, нултата редица од системот равенки можеме да ја испуштиме, а во останатите три равенки членовите што ја содржат познатата вредност на напонот $\underline{V}_0$ ги префрламе на десната страна.

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} \\ \underline{Y}_{31} & \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{J}_1 - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{10} \\ \underline{J}_2 - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{20} \\ \underline{J}_3 - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{30} \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} \\ \underline{Y}_{31} & \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \underline{J}_1 - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{10} \\ \underline{J}_2 - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{20} \\ \underline{J}_3 - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{30} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,648 + j8,211 & 1,018 + j3,158 & 0,509 + j1,579 \\ 1,018 + j3,158 & 2,376 + j7,368 & 1,188 + j3,684 \\ 0,509 + j1,579 & 1,188 + j3,684 & 2,207 + j6,842 \end{bmatrix} \times$$

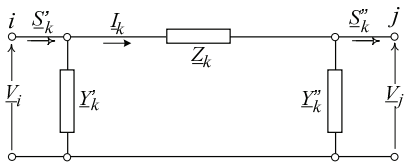
$$\times \begin{bmatrix} 1,417 - j4,829 \\ 0,840 - j2,876 \\ 1,836 - j5,805 \end{bmatrix},$$

Метод на јазлови потенцијали – пример

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63,433 - j1,488 \\ 63,445 - j1,224 \\ 63,707 - j0,790 \end{bmatrix} \text{kV} = \begin{bmatrix} 63,450 \cdot e^{-j1,34^\circ} \\ 63,457 \cdot e^{-j1,11^\circ} \\ 63,721 \cdot e^{-j0,71^\circ} \end{bmatrix} \text{kV},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} = \sqrt{3} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 109,87 - j2,58 \\ 109,89 - j2,12 \\ 110,34 - j1,37 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 109,90 \cdot e^{-j1,34^\circ} \\ 109,91 \cdot e^{-j1,11^\circ} \\ 110,35 \cdot e^{-j0,71^\circ} \end{bmatrix} \text{kV},$$

Метод на јазлови потенцијали – пример



$$\underline{I}_k = \frac{\underline{V}_i - \underline{V}_j}{\underline{Z}_k}.$$

$$\underline{S}'_k = 3 \cdot \underline{V}_i \cdot \left(\underline{I}_k + \underline{Y}'_k \cdot \underline{V}_i\right)^*,$$

$$\underline{S}''_k = 3 \cdot \underline{V}_j \cdot \left(\underline{I}_k - \underline{Y}''_k \cdot \underline{V}_j\right)^*.$$

Метод на јазлови потенцијали – пример

k	$i-j$	$\underline{S}'_k$ (MVA)	$\underline{S}''_k$ (MVA)
1	0 – 1	27,605 $+j$10,988	27,333 $+j$10,144
2	0 – 2	14,205 $+j$7,236	14,074 $+j$6,831
3	0 – 3	19,297 $+j$12,329	19,162 $+j$11,911
4	2 – 1	2,877 $-j$0,845	2,874 $-j$0,856
5	3 – 2	9,004 $+j$2,001	8,981 $+j$1,931

$$\underline{S}_{\text{P1}} = 3 \cdot \underline{V}_1 \cdot \underline{J}_1^* = (30,206 + j9,287)\ \text{MVA}$$
$$\underline{S}_{\text{P2}} = 3 \cdot \underline{V}_2 \cdot \underline{J}_2^* = (20,178 + j9,607)\ \text{MVA}$$
$$\underline{S}_{\text{P3}} = 3 \cdot \underline{V}_3 \cdot \underline{J}_3^* = (10,158 + j9,909)\ \text{MVA}$$

Метод на јазлови потенцијали – пример

Нека сега наместо струјните инјекции $\underline{J}_1$, $\underline{J}_2$ и $\underline{J}_3$ во јазлите, потрошувачката биде зададена преку моќностите на самите потрошувачи, $\underline{S}_{\mathrm{P1}}$, $\underline{S}_{\mathrm{P2}}$ и $\underline{S}_{\mathrm{P3}}$ кои изнесуваат

$$\underline{S}_{\mathrm{P1}} = (30 + j5)\ \mathrm{MVA}; \quad \underline{S}_{\mathrm{P2}} = (20 + j10)\ \mathrm{MVA} \quad \text{и} \quad \underline{S}_{\mathrm{P3}} = (10 + j10)\ \mathrm{MVA}.$$

$$\underline{J}_i = -\underline{J}_{Pi} = -\frac{\underline{S}^*_{Pi}}{3 \cdot \underline{V}^*_i} = -\frac{P_{Pi} - jQ_{Pi}}{3 \cdot \underline{V}^*_i}; \quad i = 1, 2, \ldots n,$$

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} \\ \underline{Y}_{31} & \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dfrac{P_{P1} - jQ_{P1}}{3 \cdot \underline{V}^*_1} - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{10} \\ -\dfrac{P_{P2} - jQ_{P2}}{3 \cdot \underline{V}^*_2} - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{20} \\ -\dfrac{P_{P3} - jQ_{P3}}{3 \cdot \underline{V}^*_3} - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{30} \end{bmatrix},$$

Овој нелинеарен систем равенки може да се реши со примена на Matlab, но ние ќе го решиме со едноставна итеративна постапка. Почетното решение е

$$\underline{V}_i = \underline{V}_0; \quad i = 1, 2, \ldots n,$$

Метод на јазлови потенцијали – пример

$$\underline{\boldsymbol{D}} = \begin{bmatrix} -\dfrac{P_{P1} - jQ_{P1}}{3 \cdot \underline{V}^*_1} - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{10} \\ -\dfrac{P_{P2} - jQ_{P2}}{3 \cdot \underline{V}^*_2} - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{20} \\ -\dfrac{P_{P3} - jQ_{P3}}{3 \cdot \underline{V}^*_3} - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,420 - j4,855 \\ 0,841 - j2,877 \\ 1,837 - j5,806 \end{bmatrix} \mathrm{kA}.$$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \underline{\boldsymbol{Y}}^{-1} \times \underline{\boldsymbol{D}},$$

$$\underline{\boldsymbol{Y}}^{-1} = \begin{bmatrix} 2,648 + j8,211 & 1,018 + j3,158 & 0,509 + j1,579 \\ 1,018 + j3,158 & 2,376 + j7,368 & 1,188 + j3,684 \\ 0,509 + j1,579 & 1,188 + j3,684 & 2,207 + j6,842 \end{bmatrix} \mathrm{S}.$$

Метод на јазлови потенцијали – пример

Решение во првата итерација

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63,667 - j1,530 \\ 63,548 - j1,228 \\ 63,765 - j0,789 \end{bmatrix} \mathrm{kV} = \begin{bmatrix} 63,685 \cdot e^{-j1,38^\circ} \\ 63,560 \cdot e^{-j1,11^\circ} \\ 63,770 \cdot e^{-j0,71^\circ} \end{bmatrix} \mathrm{kV},$$

Во втората итерација десната страна од системот равенки, матрицата колона $\underline{\boldsymbol{D}}$ ќе ја пресметаме со помош на напоните од првата итерација.

$$\underline{\boldsymbol{D}} = \begin{bmatrix} -\dfrac{P_{P1} - jQ_{P1}}{3 \cdot \underline{V}^*_1} - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{10} \\ -\dfrac{P_{P2} - jQ_{P2}}{3 \cdot \underline{V}^*_2} - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{20} \\ -\dfrac{P_{P3} - jQ_{P3}}{3 \cdot \underline{V}^*_3} - \underline{V}_0 \cdot \underline{Y}_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,418 - j8,407 \\ 0,841 - j2,874 \\ 1,837 - j5,804 \end{bmatrix} \mathrm{kA}.$$

и како резултат на тоа ќе добиеме нови, уточнети, вредности за напоните:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63,637 \cdot e^{-j1,38^\circ} \\ 63,515 \cdot e^{-j1,11^\circ} \\ 63,739 \cdot e^{-j0,71^\circ} \end{bmatrix} \mathrm{kV},$$

Метод на јазлови потенцијали – пример

По доволен број итерации се добива „конечното“ решение на задачата:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63,631 \cdot e^{-j1,38^\circ} \\ 63,515 \cdot e^{-j1,11^\circ} \\ 63,739 \cdot e^{-j0,71^\circ} \end{bmatrix} \text{kV},$$

односно

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} = \sqrt{3} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 110,18 - j2,65 \\ 109,99 - j2,13 \\ 110,39 - j1,36 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 110,22 \cdot e^{-j1,38^\circ} \\ 110,01 \cdot e^{-j1,11^\circ} \\ 110,40 \cdot e^{-j0,71^\circ} \end{bmatrix} \text{kV}.$$

Итерација	U_1	U_2	U_3
0	112,00	112,00	112,00
1	110,31	110,09	110,45
2	110,22	110,01	110,40
3	110,22	110,01	110,40
4	110,22	110,01	110,40

Метод на јазлови потенцијали – пример

Со помош на пресметаните напони можеме да ги пресметаме моќностите во гранките од мрежата.

k	$i-j$	$\underline{S}'_k$ (MVA)	$\underline{S}''_k$ (MVA)
1	0 – 1	27,392 $+j$ 8,111	27,141 $+j$ 7,330
2	0 – 2	14,066 $+j$ 6,705	13,941 $+j$ 6,318
3	0 – 3	19,075 $+j$ 11,839	18,946 $+j$ 11,437
4	2 – 1	2,865 $-j$ 2,313	2,859 $-j$ 2,330
5	3 – 2	8,946 $+j$ 1,437	8,924 $+j$ 1,370

Метод на контурни струи

- Се користи за брзо пресметување на тековите на моќности во мрежи со попроста конфигурација и со мал број контури. За поголеми и посложени системи начинот на формирање на системот комплексни равенки станува прилично комплициран.
- Обично наместо со струите, во пресметките се оперира со привидните моќности во гранките од мрежата поради што овој метод се среќава и под називот метод на контурни моќности.
- Овој метод е базиран на примената на Кирхофовиот закон за напони според кој сумата на падови на напони во една затворена контура во која нема внатрешни ЕМС е еднаква на нула.

$$\sum_k \underline{Z}_k \cdot \underline{I}_k = 0$$

$$\sqrt{3} \cdot U_\mathrm{n} \cdot \sum_k (\underline{Z}_k \cdot \underline{I}_k)^* = 0$$

$$\sum_k \underline{Z}_k^* \cdot \underline{S}_k \approx 0$$

Метод на контурни струи

$$\underline{Z}_{11}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{12}^* \cdot \underline{S}_2 + \ldots + \underline{Z}_{1m}^* \cdot \underline{S}_m = \underline{A}_1,$$
$$\underline{Z}_{21}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{22}^* \cdot \underline{S}_2 + \ldots + \underline{Z}_{2m}^* \cdot \underline{S}_m = \underline{A}_2,$$
$$\vdots$$
$$\underline{Z}_{m1}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{m2}^* \cdot \underline{S}_2 + \ldots + \underline{Z}_{mm}^* \cdot \underline{S}_m = \underline{A}_m,$$

$$\underline{\boldsymbol{Z}}_K^* \times \underline{\boldsymbol{S}}_K = \underline{\boldsymbol{A}}$$

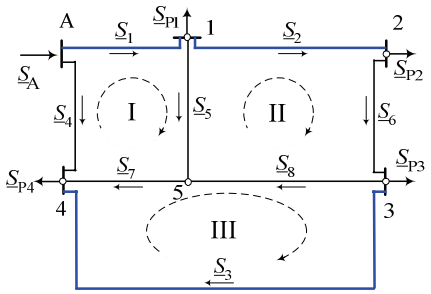
$$\underline{\boldsymbol{Z}}_K = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \cdots & \underline{Z}_{1m} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \cdots & \underline{Z}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{m1} & \underline{Z}_{m2} & \cdots & \underline{Z}_{mm} \end{pmatrix}; \quad \underline{\boldsymbol{S}}_K = \begin{pmatrix} \underline{S}_1 \\ \underline{S}_2 \\ \vdots \\ \underline{S}_m \end{pmatrix}; \quad \underline{\boldsymbol{A}} = \begin{pmatrix} \underline{A}_1 \\ \underline{A}_2 \\ \vdots \\ \underline{A}_m \end{pmatrix}.$$

Метод на контурни струи

$$\underline{\boldsymbol{Z}}_K^* \times \underline{\boldsymbol{S}}_K = \underline{\boldsymbol{A}}$$

- $\underline{\boldsymbol{Z}}_K$ е матрица на импеданции на независните контури.
  - Дијагоналниот елемент $\underline{Z}_{ii}$ на оваа матрица се добива како сума од сите импеданции што и припаѓаат на i-тата контура.
  - Вондијагоналниот елемент $\underline{Z}_{ij}$ е еднаков на сумата на импедансиите на гранките од мрежата коишто се заеднички за i-тата и j-тата контура, со знак „+“ кога насоките на i-тата и j-тата контура низ тие гранки се совпаѓаат, односно со знак „–“ во спротивниот случај.
- Матрицата $\underline{\boldsymbol{A}}$ зависи од оптоварувањата во мрежата и од импедансиите на гранките на мрежата и нејзиното определување е главниот проблем за примената на овој метод.
- Специјален случај на методот на контурни моќности е методот на раздвојување. Овој метод служи за решавање мрежи кај кои односот X/R за секоја гранка е константен или е голем број ($R \ll X$). Два система со реални равенки наместо еден комплексен.

Метод на контурни струи – пример

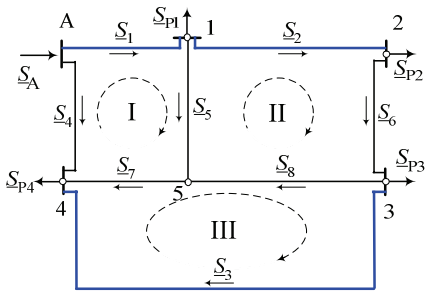


За секоја контура одбираме по една гранка што припаѓа само на таа контрура.

$$\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_1^* + \underline{S}_5 \cdot \underline{Z}_5^* + \underline{S}_7 \cdot \underline{Z}_7^* - \underline{S}_4 \cdot \underline{Z}_4^* = 0,$$
$$\underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_2^* + \underline{S}_6 \cdot \underline{Z}_6^* + \underline{S}_8 \cdot \underline{Z}_8^* - \underline{S}_5 \cdot \underline{Z}_5^* = 0,$$
$$\underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_3^* - \underline{S}_7 \cdot \underline{Z}_7^* - \underline{S}_8 \cdot \underline{Z}_8^* = 0.$$

Во овој систем равенки непознати се $\underline{S}_1$, $\underline{S}_2$ и $\underline{S}_3$ бидејќи $\underline{S}_4, \underline{S}_5, \ldots, \underline{S}_8$ можат да се изразат преку нив и преку познатите моќности $\underline{S}_{P1}, \ldots, \underline{S}_{P4}$.

Метод на контурни струи – пример



$$\underline{S}_5 = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 - \underline{S}_{P1},$$
$$\underline{S}_6 = \underline{S}_2 - S_{P2},$$
$$\underline{S}_8 = \underline{S}_6 - \underline{S}_3 - S_{P3} = \underline{S}_2 - \underline{S}_3 - (\underline{S}_{P2} + S_{P3}),$$
$$\underline{S}_7 = \underline{S}_8 + \underline{S}_5 = \underline{S}_1 - \underline{S}_3 - (\underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3}),$$
$$\underline{S}_4 = \underline{S}_{P4} - \underline{S}_7 - \underline{S}_3 = -\underline{S}_1 + (\underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4}).$$

Метод на контурни струи – пример

Ако во системот контурни равенки $\underline{S}_4, \underline{S}_5, \ldots, \underline{S}_8$ ги изразиме преку $\underline{S}_1, \underline{S}_2$ и $\underline{S}_3$ и $\underline{S}_{P1}, \ldots, \underline{S}_{P4}$ ќе го добиеме конечниот облик на системот контурни равенки

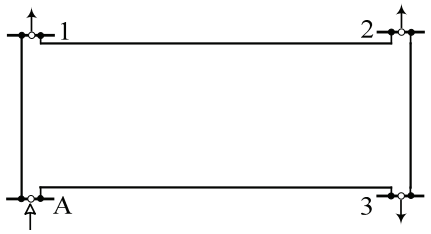
$$\underline{Z}_{11}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{12}^* \cdot \underline{S}_2 + \underline{Z}_{13}^* \cdot \underline{S}_3 = \underline{A}_1,$$
$$\underline{Z}_{21}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{22}^* \cdot \underline{S}_2 + \underline{Z}_{23}^* \cdot \underline{S}_3 = \underline{A}_2,$$
$$\underline{Z}_{31}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{32}^* \cdot \underline{S}_2 + \underline{Z}_{33}^* \cdot \underline{S}_3 = \underline{A}_3,$$

$$\underline{A}_1 = \underline{S}_{P1} \cdot (\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_7)^* + (\underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3}) \cdot (\underline{Z}_4 + \underline{Z}_7)^* + \underline{S}_{P4} \cdot \underline{Z}_7^*,$$
$$\underline{A}_2 = -\underline{S}_{P1} \cdot \underline{Z}_5^* + \underline{S}_{P2} \cdot (\underline{Z}_6 + \underline{Z}_8)^* + \underline{S}_{P3} \cdot \underline{Z}_5^*,$$
$$\underline{A}_3 = -\underline{S}_{P1} \cdot \underline{Z}_7^* + (\underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3}) \cdot (\underline{Z}_7 + \underline{Z}_8)^*.$$

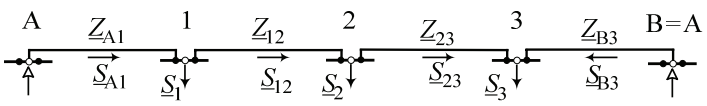
$$\underline{\boldsymbol{Z}}_K = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_7 + \underline{Z}_4 & -\underline{Z}_5 & -\underline{Z}_7 \\ -\underline{Z}_5 & \underline{Z}_2 + \underline{Z}_6 + \underline{Z}_8 + \underline{Z}_5 & -\underline{Z}_8 \\ -\underline{Z}_7 & -\underline{Z}_8 & \underline{Z}_3 + \underline{Z}_7 + \underline{Z}_8 \end{bmatrix}.$$

Приближна постапка за јамкасти мрежи

Ако мрежата содржи само една контура, контурната моќност се добива директно со формула која дава приближно решение со задоволителна точност.



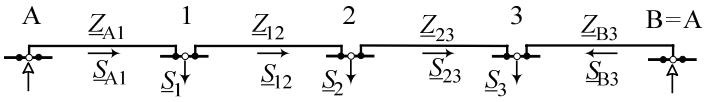
магистрален вод напојуван од двата краја



$$\underline{Z}_{A1} \cdot \underline{I}_{A1} + \underline{Z}_{12} \cdot \underline{I}_{12} + \underline{Z}_{23} \cdot \underline{I}_{23} - \underline{Z}_{B3} \cdot \underline{I}_{B3} = 0.$$

Приближна постапка за јамкасти мрежи

$$\underline{I}_{ij} = \frac{\underline{S}^*_{ij}}{\sqrt{3}\cdot U_{\mathrm{n}}} \quad \text{т.е.} \quad \underline{S}_{ij} = \sqrt{3}\cdot U_{\mathrm{n}}\cdot \underline{I}^*_{ij}.$$



$$\underline{Z}_{\mathrm{A1}}\cdot \underline{I}_{\mathrm{A1}} + \underline{Z}_{12}\cdot \underline{I}_{12} + \underline{Z}_{23}\cdot \underline{I}_{23} - \underline{Z}_{\mathrm{B3}}\cdot \underline{I}_{\mathrm{B3}} = 0.$$

Равенката ја конјугираме и потоа целата ја множиме со $\sqrt{3}\cdot U_{\mathrm{n}}$

$$\underline{S}_{\mathrm{A1}}\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{A1}} + \underline{S}_{12}\cdot \underline{Z}^*_{12} + \underline{S}_{23}\cdot \underline{Z}^*_{23} - \underline{S}_{\mathrm{B3}}\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{B3}} = 0.$$

Ако ги занемариме загубите за моќностите имаме

$$\begin{aligned}
\underline{S}_{12} &= \underline{S}_{A1} - \underline{S}_1,\\
\underline{S}_{23} &= \underline{S}_{A1} - \underline{S}_1 - \underline{S}_2,\\
\underline{S}_{B3} &= \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 - \underline{S}_{A1}.
\end{aligned}$$

Приближна постапка за јамкасти мрежи

$$\underline{S}_{\mathrm{A1}}\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{A1}} + \underline{S}_{12}\cdot \underline{Z}^*_{12} + \underline{S}_{23}\cdot \underline{Z}^*_{23} - \underline{S}_{\mathrm{B3}}\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{B3}} = 0.$$

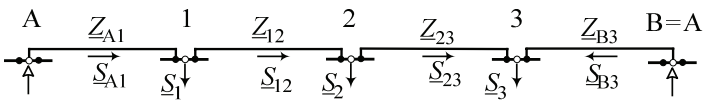
$$\begin{aligned}
\underline{S}_{\mathrm{A1}}\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{A1}} + (\underline{S}_{\mathrm{A1}} - \underline{S}_1)\cdot \underline{Z}^*_{12} + (\underline{S}_{A1} - \underline{S}_1 - \underline{S}_2)\cdot \underline{Z}^*_{23} -\\
-(\underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 - \underline{S}_{\mathrm{A1}})\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{B3}} = 0,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\underline{S}_{\mathrm{A1}}\cdot (\underline{Z}^*_{\mathrm{A1}} + \underline{Z}^*_{12} + \underline{Z}^*_{23} + \underline{Z}^*_{\mathrm{B3}}) - \underline{S}_1\cdot (\underline{Z}^*_{12} + \underline{Z}^*_{23} + \underline{Z}^*_{\mathrm{B3}}) -\\
-\underline{S}_2\cdot (\underline{Z}^*_{23} + \underline{Z}^*_{\mathrm{B3}}) - \underline{S}_3\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{B3}} = 0.
\end{aligned}$$

Ако ги воведеме ознаките:

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{\mathrm{AB}} &= \underline{Z}_{\mathrm{A1}} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{\mathrm{B3}},\\
\underline{Z}_{1\mathrm{B}} &= \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{\mathrm{B3}},\\
\underline{Z}_{2\mathrm{B}} &= \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{\mathrm{B3}},\\
\underline{Z}_{\mathrm{A1}} &= \underline{Z}_{\mathrm{A1}},\\
\underline{Z}_{\mathrm{A2}} &= \underline{Z}_{\mathrm{A1}} + \underline{Z}_{12},\\
\underline{Z}_{\mathrm{A3}} &= \underline{Z}_{\mathrm{A1}} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23},
\end{aligned}$$

Приближна постапка за јамкасти мрежи



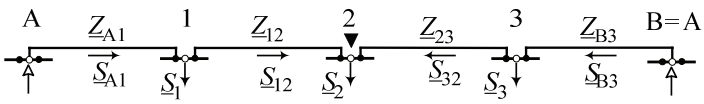
$$\underline{S}_{\mathrm{A1}} = \frac{\underline{S}_1\cdot \underline{Z}^*_{1\mathrm{B}} + \underline{S}_2\cdot \underline{Z}^*_{2\mathrm{B}} + \underline{S}_3\cdot \underline{Z}^*_{3\mathrm{B}}}{\underline{Z}^*_{\mathrm{AB}}},$$

$$\underline{S}_{\mathrm{B3}} = \frac{\underline{S}_1\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{A1}} + \underline{S}_2\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{A2}} + \underline{S}_3\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{A3}}}{\underline{Z}^*_{\mathrm{AB}}}.$$

Во општ случај, кога прстенестата мрежа напојува n оптоварувања, би било:

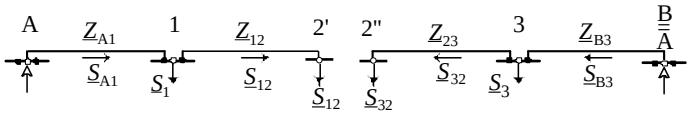
$$\underline{S}_{\mathrm{A1}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} \underline{S}_i\cdot \underline{Z}^*_{i\mathrm{B}}}{\underline{Z}^*_{\mathrm{AB}}}; \quad \underline{S}_{\mathrm{B}n} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} \underline{S}_i\cdot \underline{Z}^*_{\mathrm{A}i}}{\underline{Z}^*_{\mathrm{AB}}}.$$

Приближна постапка за јамкасти мрежи



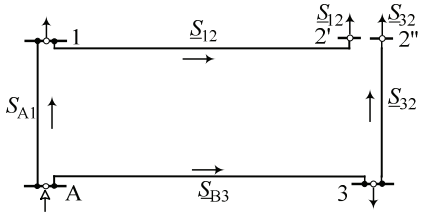
Како резултат од првата етапа од пресметките е добиена распределба на тековите на моќности. Кон точката 2 моќноста доаѓа од двете страни на мрежата – разделна точка ▼.

Ништо нема да се измени ако ја раздвоиме мрежата во разделната точка, при потрошувачот се дели на два фиктивни потрошувача $\underline{S}'_2 = \underline{S}_{12}$ и $\underline{S}''_2 = \underline{S}_{32}$

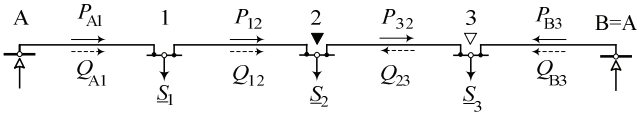


$$\underline{S}'_2 + \underline{S}''_2 = \underline{S}_{12} + \underline{S}_{32} = \underline{S}_2$$

Приближна постапка за јамкасти мрежи

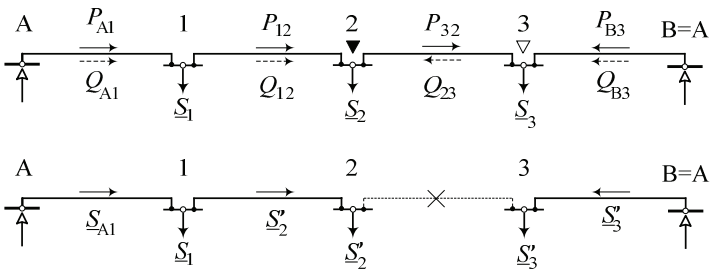


Шемата содржи два независни дела и секој од нив претставува радијална мрежа со познати оптоварувања и познат напон во напојната точка.



По изведувањето на првиот чекор од пресметките може да се случи во мрежата да се јават две разделни точки – едната за активна, а другата за реактивна моќност.

Приближна постапка за јамкасти мрежи



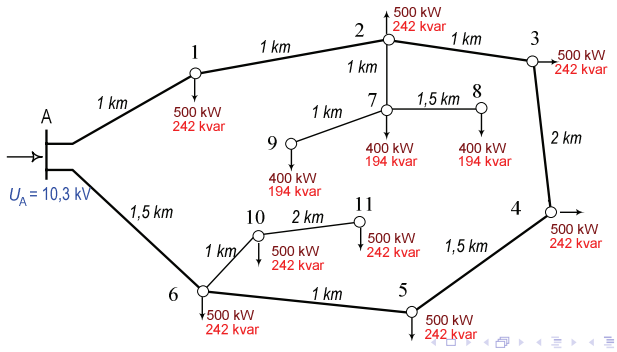
Водот 2–3 е испуштен, но при определувањето на $\underline{S}'_2$ и $\underline{S}'_3$ треба да се земат предвид и загубите на моќност во него.

$$\Delta P_{23} = \frac{P_{32}^2 + Q_{23}^2}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot R_{23}, \quad \Delta Q_{23} = \frac{P_{32}^2 + Q_{23}^2}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot X_{23},$$

$$\underline{S}'_2 = P'_2 + jQ'_2 = P_{12} + j(Q_{12} + \Delta Q_{23}),$$
$$\underline{S}'_3 = P'_3 + jQ'_3 = P_{B3} + \Delta P_{23} + jQ_{B3}.$$

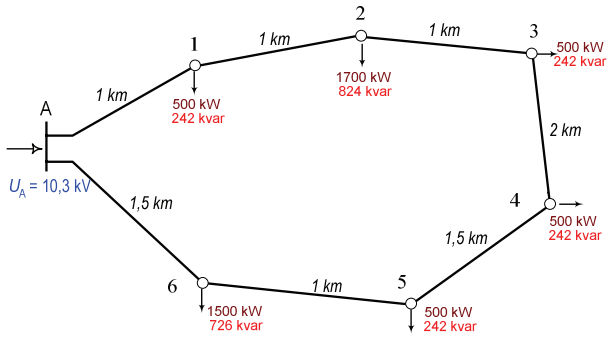
Пример 1

На сликата е прикажана прстенестата мрежа анализирана во примерот 5.4. Но овој пат мрежата работи како затворена, со вклучени сите делници од прстенот. Параметрите на елементите од мрежата како и моќностите на товарите се исти како и во примерот 5.4. Напонот во напојниот јазел изнесува $U_{\mathrm{A}} = 10,3\,\mathrm{kV}$.
Да се пресмета приближната распределба на моќностите во мрежата и врз основа на тоа да се определи точката на раздел во мрежата. Потоа да се изврши отворање на мрежата во точката на раздел со што прстенестата мрежа ќе се распадне на две радијални мрежи напојувани од истата напојна точка „А“. Во така отворената мрежа да се пресметаат напоните во сите јазли од мрежата. Колкава е загубата на напон ΔU во мрежата?



Пример 1

Сите товари се сведени кон прстенот. Моќноста во јазелот „2“ ќе биде: (500+j242) + 3×(400+j194) = (1700+j824) kVA додека во јазелот „6“ таа ќе изнесува 3×(500+j242) = (1500+j726) kVA.



Пример 1

$$\underline{S}_{A-1} = \frac{\sum_{k=1}^{6} \underline{S}_k \cdot \underline{Z}^*_{k-B}}{\underline{Z}^*_{A-B}} = \frac{\sum_{k=1}^{6} \underline{S}_k \cdot l_{k-B}}{l_{A-B}},$$

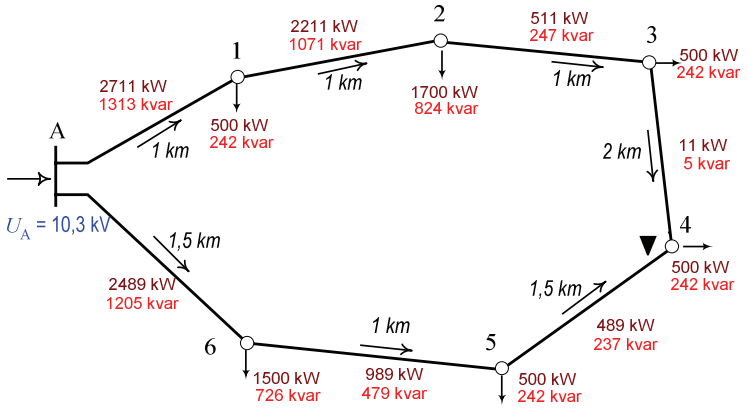
$$\underline{S}_{A-1} = \underline{S}_1 = \frac{8 \cdot (500 + j242) + 7 \cdot (1700 + j824) + 6 \cdot (500 + j242)}{9} + \\ + \frac{4 \cdot (500 + j242) + 2,5 \cdot (500 + j242) + 1,5 \cdot (1500 + j726)}{9},$$

$$\underline{S}_{A-1} = (2711 + j1313)\,\mathrm{kVA}.$$

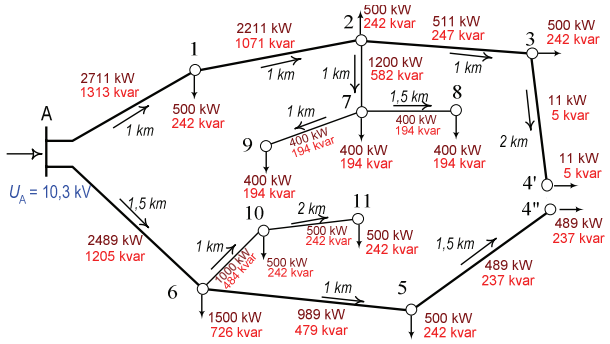
Во последните две релации место со конјугираните вредности на импеданциите на редните гранки од мрежата оперирамe со нивните должини зашто сите водови имаат еднакви параметри по единица должина.

Пример 1

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_{\mathrm{A}-1} - \underline{S}_1 = (2711 - j1313) - (500 + j242) = (2211 + j1071)\ \mathrm{kVA},$$
$$\underline{S}_{2-3} = \underline{S}_{1-2} - \underline{S}_2 = (2211 + j1071) - (1700 + j824) = (511 + j247)\ \mathrm{kVA},$$



Пример 1



$$\Delta U_1 = \frac{P_{\mathrm{A}-1} \cdot R_1 + Q_{\mathrm{A}-1} \cdot X_1}{U_{\mathrm{A}}} = \frac{P_{\mathrm{A}-1} \cdot r + Q_{\mathrm{A}-1} \cdot x}{U_{\mathrm{A}}} \cdot l_1,$$
$$\Delta U_1 = \frac{2656 \cdot 0,208 + 1287 \cdot 0,092}{10,3} \cdot 1 = 0,065\ \mathrm{kV},$$
$$U_1 = U_{\mathrm{A}} - \Delta U_1 = 10,3 - 0,065 = 10,235\ \mathrm{kV}.$$

Пример 1

Бр.	Делница	$P_{\Sigma i}$ (kW)	$Q_{\Sigma i}$ (kvar)	ΔU_i (V)	U_i (kV)
1	A – 1	2711	1313	66,5	10,2335
2	1 – 2	2211	1071	54,6	10,1790
3	2 – 3	511	247	12,7	10,1663
4	3 – 4′	11	5	0,5	10,1658
5	A – 6	2489	1205	91,5	10,2085
6	6 – 5	989	479	24,2	10,1842
7	5 – 4″	489	237	18,0	10,1662
8	2 – 7	1200	582	30,0	10,1520
9	7 – 8	400	194	15,0	10,1370
10	7 – 9	400	194	10,0	10,1420
11	6 – 10	1000	484	25,0	10,1820
12	10 – 11	500	242	25,0	10,1570

За точката 4 ќе усвоиме $U_4 = (U_{4'} + U_{4''})/2$ = 10,166 kV.

Точка со најнизок напон во мрежата е јазелот бр. 8. Загубата на напон во мрежата изнесува

$$\Delta U = U_{\mathrm{A}} - U_8 = 10,3 - 10,137 = 0,163\ \mathrm{kV}\ (1,63\%).$$

Метод на раздвојување на мрежата

Распределба на моќностите во јамкастата мрежа, со една или повеќе пасивни контури (не содржат електромоторни сили или трансформатори со различни коефициенти на трансформација).

$$\sum_{i=1}^{m} \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i = 0.$$

$$0 = \sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \sum_{i=1}^{m} \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i = \sum_{i=1}^{m} (P_i - jQ_i) \cdot (R_i + jX_i).$$

$$0 = \sum_{i=1}^{m} (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i) - j \sum_{i=1}^{m} (P_i \cdot X_i - Q_i \cdot R_i)$$

$$\sum_{i=1}^{m} (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^{m} (P_i \cdot X_i - Q_i \cdot R_i) = 0$$

Метод на раздвојување на мрежата

$$\sum_{i=1}^{m} (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i) = 0$$

$$0 = \frac{R_1}{X_1} \cdot P_1 \cdot X_1 + \frac{R_2}{X_2} \cdot P_2 \cdot X_2 + \cdots + \frac{R_n}{X_n} \cdot P_n \cdot X_n + \\ + \frac{X_1}{R_1} \cdot Q_1 \cdot R_1 + \frac{X_2}{R_2} \cdot Q_2 \cdot R_2 + \cdots + \frac{X_n}{R_n} \cdot Q_n \cdot R_n.$$

хомогена мрежа

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{X_2}{R_2} = \frac{X_3}{R_3} = \cdots = \frac{X_n}{R_n} = \xi = \mathrm{const.}$$

$$\frac{1}{\xi} \cdot \sum_{i=1}^{m} P_i \cdot X_i + \xi \cdot \sum_{i=1}^{m} Q_i \cdot R_i = 0.$$

Метод на раздвојување на мрежата

$$\sum_{i=1}^{m} (P_i \cdot X_i - Q_i \cdot R_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^{m} Q_i \cdot R_i = \sum_{i=1}^{m} P_i \cdot X_i.$$

$$\frac{1}{\xi} \cdot \sum_{i=1}^{m} P_i \cdot X_i + \xi \cdot \sum_{i=1}^{m} Q_i \cdot R_i = 0.$$

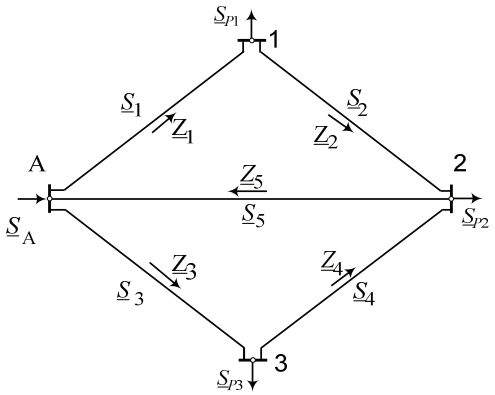
Од последните две равенки следува

$$\sum_{i=1}^{m} P_i \cdot X_i = 0 \qquad \sum_{i=1}^{m} Q_i \cdot R_i = 0$$

Овие две равенки се независни и кажуваат дека кај хомогените мрежи распределбата на активните моќности зависи само од реактивните отпорности, а распределбата на реактивните моќности зависи само од активните отпорности на редните гранки од мрежата.

Пример 2

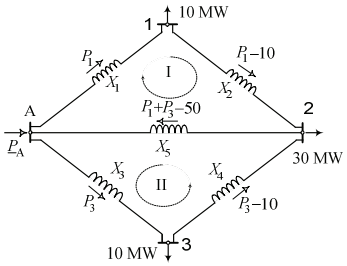
Да се одреди распределбата на моќности во 110 kV мрежа.

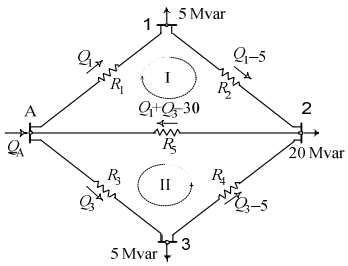


Бројни вредности: $\underline{Z}_1 = (10 + j20)\ \Omega$; $\underline{Z}_2 = (5 + j10)\ \Omega$; $\underline{Z}_3 = (10 + j20)\ \Omega$; $\underline{Z}_4 = (6 + j12)\ \Omega$; $\underline{Z}_5 = (20 + j40)\ \Omega$; $\underline{S}_{P1} = (10 + j5)$ MVA; $\underline{S}_{P2} = (30 + j20)$ MVA; $\underline{S}_{P3} = (10 + j5)$ MVA.

Пример 2

Бидејќи мрежата е хомогена (водовите имаат еднакви импеданции по единица должина), можеме да го примениме методот на раздвојување.

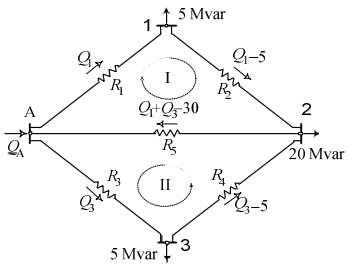




$$P_1 \cdot X_1 + (P_1 - 10) \cdot X_2 + (P_1 + P_3 - 50) \cdot X_5 = 0,$$
$$P_3 \cdot X_3 + (P_3 - 10) \cdot X_4 + (P_1 + P_3 - 50) \cdot X_5 = 0,$$

$$70 \cdot P_1 + 40 \cdot P_3 = 2100,$$
$$40 \cdot P_1 + 72 \cdot P_3 = 2120.$$
$$P_1 = 19,3\,\mathrm{MW} \quad P_3 = 18,7\,\mathrm{MW}$$

Пример 2



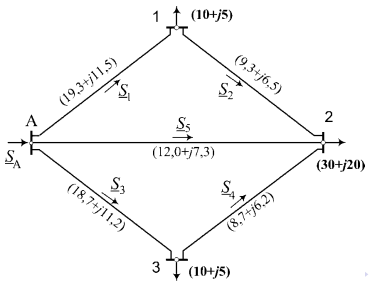
$$Q_1 \cdot R_1 + (Q_1 - 5) \cdot R_2 + (Q_1 + Q_3 - 30) \cdot R_5 = 0,$$
$$Q_3 \cdot R_3 + (Q_3 - 5) \cdot R_4 + (Q_1 + Q_3 - 30) \cdot R_5 = 0,$$

$$35 \cdot Q_1 + 20 \cdot Q_3 = 625,$$
$$20 \cdot Q_1 + 36 \cdot Q_3 = 630,$$
$$Q_1 = 11,5\,\mathrm{Mvar} \quad Q_3 = 11,2\,\mathrm{Mvar}$$

Пример 2

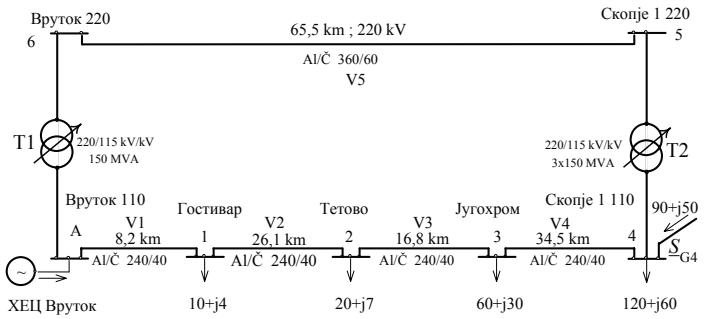
$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{A-1} = (P_1 + jQ_1) = (19,3 + j11,5)\ \mathrm{MVA},$$
$$\underline{S}_3 = \underline{S}_{A-3} = (P_3 + jQ_3) = (18,7 + j11,2)\ \mathrm{MVA}.$$

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{1-2} = S_1 - \underline{S}_{P1} = (19,3 + j11,5) - (10 + j5) = (9,3 + j6,5)\ \mathrm{MVA},$$
$$\underline{S}_4 = \underline{S}_{3-2} = \underline{S}_3 - \underline{S}_{P3} = (18,7 + j11,2) - (10 + j5) = (8,7 + j6,2)\ \mathrm{MVA},$$
$$\underline{S}_5 = \underline{S}_{2-A} = \underline{S}_1 + \underline{S}_3 - \Sigma\underline{S}_P = (38 + j22,7) - (50 + j30) = (-12 - j7,3)\ \mathrm{MVA},$$
$$\underline{S}_{A-2} = -\underline{S}_5 = (12 + j7,3)\ \mathrm{MVA}.$$



Пример 3

Се посматра дел од високонапонската преносна мрежа на ЕЕС на Република Македонија, на потегот Вруток - Скопје. Потребно е да се пресмета приближната распределба на моќности во мрежата, напонските прилики во неа и да се проценат вкупните загуби во прикажаниот режим. Водот 220 kV „Вруток 220 - Скопје 1 220“ има подолжни параметри $\underline{z} = (0,08 + 0,42)\ \Omega/\mathrm{km}$ и $b = 2,62\ \mu\mathrm{S/km}$. Останатите водови се за 110 kV напон и имаат еднакви подолжни параметри: $\underline{z} = (0,123 + 0,40)\ \Omega/\mathrm{km}$ и $b = 2,75\ \mu\mathrm{S/km}$. Напонот во напојната точка изнесува $U_\mathrm{A} = 115\ \mathrm{kV}$. За трансформаторите се познати следните податоци:
T1: 1×150 MVA; (220±12×1,25%)/115 kV/kV; $u_k\%$ = 10,9%;
T1: 3×150 MVA; (220±12×1,25%)/115 kV/kV; $u_k\%$ = 15,4%.



Пример 3

Бр.	Име на јазелот	Ознака во шемата	P_P (MW)	Q_P (Mvar)
1	Вруток 110	A	/	/
2	Гостивар	1	10	4
3	Тетово	2	20	7
4	Југохром	3	60	30
5	Скопје 1 110	4	120	60
6	Скопје 1 220	5	/	/
7	Вруток 220	6	/	/

Бр.	Елемент	Должина (km)	$R\ (\Omega)$	$X\ (\Omega)$	$B\ (\mu\mathrm{S})$
1	Вод A – 1	8,2	1,01	3,28	22,6
2	Вод 1 – 2	26,1	3,21	10,44	71,84
3	Вод 2 – 3	16,8	2,07	6,72	46,2
4	Вод 3 – 4	34,5	4,24	13,80	67,4
5	Трансформатор T1	–	–	9,61	–
6	Трансформатор T2	–	–	4,53	–
7	Вод 5 – 6	65,5	1,43	7,52	628

Пример 3

$$Q_{C1} = b \cdot U_{\mathrm{n}}^2 \cdot (l_{\mathrm{A}-1} + l_{1-2})/2 = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot (8,2 + 26,1)/2 = 0,57\ \mathrm{Mvar},$$
$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{P1} - jQ_{C1} = (10 + j3,43)\ \mathrm{MVA},$$
$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{P2} - jQ_{C2} = (20 + j6,29)\ \mathrm{MVA},$$
$$Q_{C3} = b \cdot U_{\mathrm{n}}^2 \cdot \frac{l_{2-3} + l_{3-4}}{2} = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot \frac{16,8 + 34,5}{2} = 0,85\ \mathrm{MVAr},$$
$$\underline{S}_3 = \underline{S}_{P3} - jQ_{c3} = (60 + j29,14)\ \mathrm{MVA},$$
$$Q_{C4} = b \cdot U_{\mathrm{n}}^2 \cdot l_{3-4}/2 = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot 34,5/2 = 0,57\ \mathrm{MVAr},$$
$$\underline{S}_4 = \underline{S}_{P4} - \underline{S}_{G4} - jQ_{C4} = (30 + j9,43)\ \mathrm{MVA},$$
$$Q_{C5} = b_{220.\text{СВ.}} \cdot U_{\mathrm{n}}^2 \cdot \frac{l_{5-6}}{2} = 2,62 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{220^2}{115^2} \cdot 110^2 \cdot \frac{65,5}{2} = 3,8\ \mathrm{MVAr},$$
$$\underline{S}_5 = \underline{S}_{P5} - jQ_{C5} = -j3,80\ \mathrm{MVA},$$
$$Q_{C6} = b_{220.\text{СВ.}} \cdot U_{\mathrm{n}}^2 \cdot \frac{l_{5-6}}{2} = 2,62 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{220^2}{115^2} \cdot 110^2 \cdot \frac{65,5}{2} = 3,8\ \mathrm{MVAr},$$
$$\underline{S}_6 = \underline{S}_{P6} - jQ_{C6} = -j3,80\ \mathrm{MVA},$$
$$Q_{C\Sigma} = Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3} + Q_{C4} + Q_{cC} + Q_{C6} = 10,46\ \mathrm{MVAr}.$$

Пример 3

$$\underline{S}_{\mathrm{A}-1} = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}^*_{1-\mathrm{B}} + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}^*_{2-\mathrm{B}} + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}^*_{3-\mathrm{B}} + \underline{S}_4 \cdot \underline{Z}^*_{4-\mathrm{B}}}{\underline{Z}^*_{\mathrm{A}-\mathrm{B}}},$$
$$\underline{S}_{\mathrm{A}-6} = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}^*_{1-\mathrm{A}} + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}^*_{2-\mathrm{A}} + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}^*_{3-\mathrm{A}} + \underline{S}_4 \cdot \underline{Z}^*_{4-\mathrm{A}}}{\underline{Z}^*_{\mathrm{A}-\mathrm{B}}},$$

$$\underline{Z}_{V1} = (1,01 + j3,28)\ \Omega; \quad \underline{Z}_{V2} = (3,21 + j10,44)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{V3} = (2,07 + j6,72)\ \Omega; \quad \underline{Z}_{V4} = (4,24 + j13,80)\ \Omega; \quad \underline{Z}_{V5} = (1,43 + j7,52)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{T1} = j9,61\ \Omega; \quad \underline{Z}_{T2} = j4,53\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{A-B} = \underline{Z}_{A-1} + \underline{Z}_{1-2} + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_{3-4} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{5-6} + \underline{Z}_{T2} = (11,96 + j55,90)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{1-B} = \underline{Z}_{1-2} + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_{3-4} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{5-6} + \underline{Z}_{T2} = (10,95 + j52,62)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{2-B} = \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_{3-4} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{5-6} + \underline{Z}_{T2} = (7,74 + j42,18)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{3-B} = \underline{Z}_{3-4} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{5-6} + \underline{Z}_{T2} = (5,67 + j35,46)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{4-B} = \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{5-6} + \underline{Z}_{T2} = (1,43 + j21,66)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{5-B} = \underline{Z}_{5-6} + \underline{Z}_{T2} = (1,43 + j17,13)\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_{6-B} = \underline{Z}_{T2} = j9,61\ \Omega.$$

Пример 3

$$\underline{Z}_{i-\mathrm{A}} = \underline{Z}_{\mathrm{A}-\mathrm{B}} - \underline{Z}_{i-\mathrm{B}}, \quad i = 1, 2, \ldots, 6.$$

Како резултат од пресметките се добива $\underline{S}_{\mathrm{A}-1} = (74,65 + j23,91)\ \mathrm{MVA}$ и $\underline{S}_{\mathrm{A}-6} = (45,35 + j17,38)\ \mathrm{MVA}$.

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_{\mathrm{A}-1} - \underline{S}_1 = (74,65 + j23,91) - (10,0 + j3,43) = (64,65 + j20,48)\ \mathrm{MVA},$$
$$\underline{S}_{2-3} = \underline{S}_{1-2} - \underline{S}_2 = (64,65 + j20,48) - (20,0 + j6,29) = (44,65 + j14,19)\ \mathrm{MVA},$$
$$\underline{S}_{4-3} = \underline{S}_3 - \underline{S}_{2-3} = (60,0 + j29,14) - (44,65 + j14,19) = (15,35 + j14,95)\ \mathrm{MVA}$$
$$\underline{S}_{5-4} = \underline{S}_{4-3} + \underline{S}_4 = (15,35 + j14,95) + (30,0 + j9,43) = (45,35 + j24,38)\ \mathrm{MVA},$$
$$\underline{S}_{6-5} = \underline{S}_{5-4} + \underline{S}_5 = (45,35 + j24,38) + (0 - j3,80) = (45,35 + j20,58)\ \mathrm{MVA}.$$

Примената на Кирхофоввиот закон за моќности за јазелот бр. 6 ќе ни послужи како проверка за точноста на пресметките:

$$\underline{S}_{A-6} = \underline{S}_{6-5} + \underline{S}_6 = (45,35 + j20,58) + (0 - j3,80) = (45,35 + j16,78)\ \mathrm{MVA},$$

а тоа е резултат еднаков со резултатот за моќноста $\underline{S}_{\mathrm{A}-6}$, добиен претходно. Точка на раздел во мрежата е јазелот 3 (Југохром).

Пример 3

$$
\begin{aligned}
U_1 &\approx U_{\mathrm{A}} - (P_{\mathrm{A}-1} \cdot R_1 + Q_{\mathrm{A}-1} \cdot X_1)/U_{\mathrm{A}} = \\
&= 115 - (74,65 \cdot 1,01 + 23,91 \cdot 3,28)/115 = 113,66\ \mathrm{kV}; \\
U_2 &\approx U_1 - (P_{1-2} \cdot R_2 + Q_{1-2} \cdot X_2)/U_1 = \\
&= 113,66 - (64,65 \cdot 3,21 + 20,48 \cdot 10,44)/113,66 = 109,96\ \mathrm{kV}; \\
U_3 &\approx U_2 - (P_{2-3} \cdot R_3 + Q_{2-3} \cdot X_3)/U_2 = \\
&= 109,96 - (44,66 \cdot 2,07 + 14,19 \cdot 6,72)/109,96 = 108,25\ \mathrm{kV}; \\
U_4 &\approx U_3 + (P_{4-3} \cdot R_4 + Q_{4-3} \cdot X_4)/U_3 = \\
&= 108,25 + (15,36 \cdot 4,24 + 14,95 \cdot 13,80)/108,25 = 110,76\ \mathrm{kV}; \\
U_5 &\approx U_4 + (P_{5-4} \cdot R_5 + Q_{5-4} \cdot X_5)/U_4 = \\
&= 110,76 + (45,36 \cdot 0 + 24,38 \cdot 4,53)/110,76 = 111,75\ \mathrm{kV}; \\
&U_{5.\text{сведено}} = k_{T2} \cdot U_5 = 213,79\ \mathrm{kV}; \\
U_6 &\approx U_5 + (P_{6-5} \cdot R_6 + Q_{6-5} \cdot X_6)/U_5 = \\
&= 111,75 + (45,36 \cdot 1,43 + 20,58 \cdot 7,52)/111,75 = 113,72\ \mathrm{kV}; \\
&U_{6.\text{сведено}} = k_{T1} \cdot U_6 = 217,55\ \mathrm{kV}.
\end{aligned}
$$

Пример 3

Прстенот ќе го отвориме во точката на раздел 3 (Гостивар). Со познатите $U_3 = 108,25\ \mathrm{kV}$ и $\underline{S}''_{2-3} = (44,65 + j14,19)\ \mathrm{MVA}$ ќе ја добиеме моќноста $\underline{S}'_{2-3}$

$$
\Delta P_{2-3} = \frac{\left(P''_{2-3}\right)^2 + \left(Q''_{2-3}\right)^2}{U_3^2} \cdot R_{2-3} = \frac{44,65^2 + 14,19^2}{108,25^2} \cdot 2,07 = 0,39\ \mathrm{MW};
$$

$$
\begin{aligned}
\Delta Q_{2-3} &= \frac{\left(P''_{2-3}\right)^2 + \left(Q''_{2-3}\right)^2}{U_3^2} \cdot X_{2-3} - \frac{b}{2} \cdot l_{2-3} \cdot U_3^2 = \\
&= \frac{44,65^2 + 14,19^2}{108,25^2} \cdot 6,72 - \frac{2,75 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 16,8 \cdot 108,25^2 = 15,17\ \mathrm{Mvar};
\end{aligned}
$$

$$
\underline{S}'_{2-3} = \underline{S}''_{2-3} + \Delta P_{2-3} + j\Delta Q_{2-3} = (45,04 + j15,17)\ \mathrm{MVA}.
$$

$$
\underline{S}''_{2-3} = \underline{S}_{2-3} + \underline{S}_2 = (45,04 + j15,17) + (20 + j7) = (65,04 + j22,17)\ \mathrm{MVA}.
$$

Пример 3

$$
\begin{aligned}
\underline{S}_{1-2} &= \underline{S}''_{1-2} - j\frac{b}{2} \cdot l_{1-2} \cdot U_2^2 = (65,04 + j22,17) - j0,43 = \\
&= (65,04 + j21,74)\ \mathrm{MVA}.
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\underline{\Delta S}_{1-2} &= \frac{P_{1-2}^2 + Q_{1-2}^2}{U_2^2} \cdot (R_2 + jX_2) - j \cdot b \cdot \frac{l_{1-2}}{2} \cdot (U_1^2 + U_2^2) = \\
&= \frac{65,04^2 + 21,74^2}{109,96^2} \cdot (3,21 + j10,44) - \\
&- j2,75 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{26,1}{2} \cdot (109,96^2 + 113,66^2) = (1,25 + j3,17)\ \mathrm{MVA}.
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\underline{S}'_{1-2} &= \underline{S}''_{1-2} + \underline{\Delta S}_{1-2} = (65,04 + j22,17) + (1,25 + j3,17) = \\
&= (66,29 + j25,34)\ \mathrm{MVA}.
\end{aligned}
$$

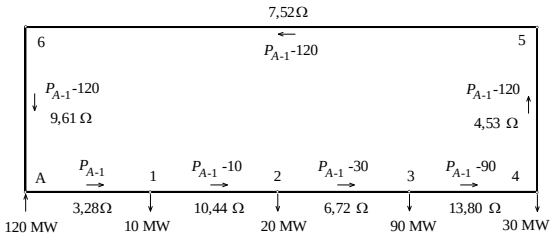
Понатаму следи постапката за пресметување на моќноста низ водот $V_{\mathrm{A}-1}$, а потоа и моќноста низ преостанатите водови од мрежата. Таа е идентична како во разгледуваниот случај со водот V_{1-2}.

Пример 3

		Приближни резултати			Точни резултати		
Бр.	MVA	Почеток	Крај	U (kV)	Почеток	Крај	U (kV)
1	$\underline{S}_{A-1}$	76,8+j30,7	76,3+j29,3	113,7	78,1+j31,9	77,6+j30,3	114,1
2	$\underline{S}_{1-2}$	66,3+j25,3	65,0+j22,2	110,0	67,7+j26,3	66,3+j22,9	109,1
3	$\underline{S}_{2-3}$	45,0+j15,2	44,7+j14,2	108,3	46,3+j15,9	45,8+j15,1	107,3
4	$\underline{S}_{4-3}$	15,5+j15,8	15,4+j15,8	110,8	14,3+j14,3	14,2+j14,9	109,7
5	$\underline{S}_{5-4}$	45,5+j26,8	45,5+j25,8	111,8	44,3+j25,3	44,3+j24,3	110,8
6	$\underline{S}_{6-5}$	45,8+j20,4	45,5+j26,8	113,7	44,6+j19,7	44,3+j25,3	113,1
7	$\underline{S}_{A-6}$	45,8+j22,3	45,8+j20,4	/	44,6+j21,7	44,6+j19,7	/
A	$\underline{S}_{A}$	122,6+j53,0	/	115,0	122,7+j53,6	/	115,0

Пример 4

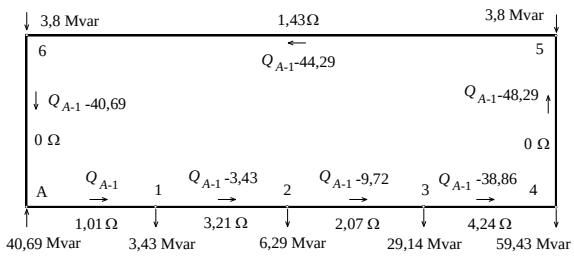
Се посматра мрежата од ретходниот пример. Со помош на методот на раздвојување на моќности да се определи распределбата на моќности и напонските прилики во системот. Обата трансформатора работат со номинален преносен однос $k_{T1} = k_{T2} = k_{Tn} = 220/115\,\mathrm{kV/kV}$.



$$P_{\mathrm{A}-1}X_1 + (P_{\mathrm{A}-1} - P_1)X_2 + (P_{\mathrm{A}-1} - P_1 - P_2)X_3 + (P_1 + P_2 + P_3 - P_{\mathrm{A}-1})X_4 +$$
$$+ (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P_{\mathrm{A}-1})(X_5 + X_6 + X_7) = 0,$$

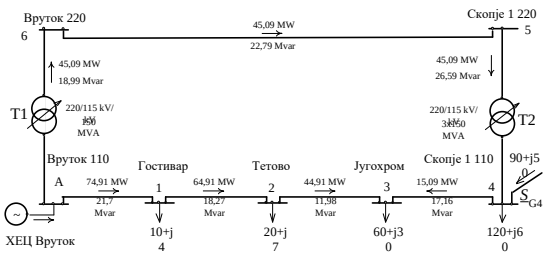
$$P_{\mathrm{A}-1} \cdot 3,28 + (P_{\mathrm{A}-1} - 10) \cdot 10,44 + (P_{\mathrm{A}-1} - 30) \cdot 6,72 + (P_{\mathrm{A}-1} - 90) \cdot 13,8 +$$
$$+ (P_{\mathrm{A}-1} - 120) \cdot 21,66 = 0,$$
$$\Rightarrow P_{\mathrm{A}-1} = 74,91\ \mathrm{MW}.$$

Пример 4



$$Q_{\mathrm{A}-1} \cdot 1,01 + (Q_{\mathrm{A}-1} - 3,43) \cdot 3,21 + (Q_{\mathrm{A}-1} - 9,72) \cdot 2,07 +$$
$$+ (Q_{\mathrm{A}-1} - 38,86) \cdot 4,24 + (Q_{\mathrm{A}-1} - 48,29) \cdot 0 + (Q_{\mathrm{A}-1} - 44,49) \cdot 1,43 +$$
$$+ (Q_{\mathrm{A}-1} - 40,69) \cdot 0 = 0,$$
$$\Rightarrow Q_{\mathrm{A}-1} = 21,7\ \mathrm{Mvar}.$$

Пример 4



Пример 4

Понатамошните пресметки („сечење“ и отворање на прстенот, поделба на мрежата, пресметка на приближните вредности на напоните, пресметка на загубите на моќност и уточнување на тековите на моќности) се изведуваат исто како во претходниот пример.

		Приближни резултати			Точни резултати		
Бр.	MVA	Почеток	Крај	U (kV)	Почеток	Крај	U (kV)
1	$\underline{S}_{A-1}$	77,0+j28,4	76,5+j27,0	113,7	78,1+j31,9	77,6+j30,3	114,1
2	$\underline{S}_{1-2}$	66,5+j23,0	65,3+j19,9	110,2	67,7+j26,3	66,3+j22,9	109,1
3	$\underline{S}_{2-3}$	45,3+j12,9	44,9+j12,0	108,6	46,3+j15,9	45,8+j15,1	107,3
4	$\underline{S}_{4-3}$	15,3+j17,5	15,1+j18,0	111,4	14,3+j14,3	14,2+j14,9	109,7
5	$\underline{S}_{5-4}$	45,3+j28,5	45,3+j27,5	112,5	44,3+j25,3	44,3+j24,3	110,8
6	$\underline{S}_{6-5}$	45,6+j22,1	45,3+j28,5	113,4	44,6+j19,7	44,3+j25,3	113,1
7	$\underline{S}_{A-6}$	45,6+j24,0	45,6+j22,1	/	44,6+j21,7	44,6+j19,7	/
A	$\underline{S}_{A}$	122,6+j52,4	/	115,0	122,7+j53,6	/	115,0

Електрични мрежи

Димензионирање на радијалните дистрибутивни мрежи

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

Општо

- Во досегашните пресметки беа познати оптоварувањата и сите параметри на мрежата, а со пресметките се определуваше загубата на напон и загубата на моќност.
- При проектирањето може да се јави потреба и од решавање на друг вид проблеми: определувањето на потребниот пресек на поедините водови во мрежата така што загубите на напонот да бидат најмногу еднакви на $\Delta U_{\text{дозв.}}$
- Бидејќи погонската индуктивна отпорност малку се менува со промената на пресекот вообичаено е пресметките да се вршат со просечните вредности x кои практично зависат само од номиналниот напон

	Просечна вредност за $x(\Omega/\mathrm{km})$	
U_n (kV)	надземни водови	кабелски водови
110	0,40	/
35	0,39	0,13
20	0,38	0,11
10	0,37	0,08
до 1	0,33	0,06

Општо

При познато оптоварување на водот $\underline{S} = P + jQ$, позната должина l и претпоставена индуктивна отпорност x за загубата на напонот се добива

$$\Delta U = \Delta U_{\mathrm{a}} + \Delta U_{\mathrm{r}} = \frac{P \cdot R}{U_{\mathrm{n}}} + \frac{Q \cdot X}{U_{\mathrm{n}}} \leq \Delta U_{\text{дозв.}}$$

од што следува

$$\frac{P \cdot R}{U_{\mathrm{n}}} \leq \Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{r}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{Q \cdot X}{U_{\mathrm{n}}}$$

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = (\Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{r}}) = \left(\Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{Q \cdot X}{U_{\mathrm{n}}}\right)$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\sigma \cdot A}$$

$$\frac{P \cdot R}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{P \cdot l}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A} \leq \Delta U_{\text{а.дозв.}}$$

$$A \geq \frac{P \cdot l}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}}$$

Општо

$$A \geq \frac{P \cdot l}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}}$$

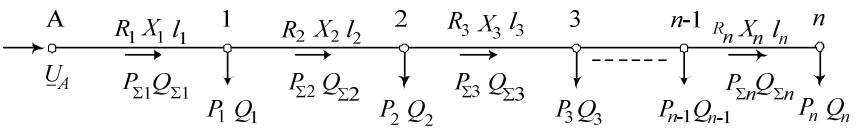
Бидејќи напречните пресеци се стандардизирани, го избираме првиот најблизок пресек до пресметаниот. За тој пресек се определуваат точните вредности на надолжните параметри r и x, а потоа и соодветната загуба на напонот

$$\Delta U = \frac{l}{U_{\mathrm{n}}} \cdot (P \cdot r + Q \cdot x) = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_{\mathrm{n}}}$$

Ако е исполнет условот $\Delta U \leq \Delta U_{\text{дозв.}}$, тогаш избраниот пресек може да се усвои за разгледуваниот вод. Но ако се случи да биде $\Delta U > \Delta U_{\text{дозв.}}$, тогаш ќе треба да се избере следниот поголем стандарден пресек и целата постапка за проверка на загубата на напон уште еднаш да се повтори.

Димензионирање според критериумот на константен пресек

- Критериумот $\Delta U \leq \Delta U_{\text{дозв.}}$ е доволен за случај на мрежа од само еден вод.
- Кога мрежата има поголем број водови за нејзиното димензионирање е неопходно да се воведат и дополнителни услови. Еден од почесто применуваните дополнителни услови е критериумот на константен пресек.



$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \ldots + \Delta U_{n-1} + \Delta U_n = \sum_{i=1}^{n} \Delta U_i$$

$$\Delta U = \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i)$$

$$\Delta U = \frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{P_{\Sigma i} \cdot l_i}{A_i} + \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i$$

Димензионирање според критериумот на константен пресек

$$\Delta U = \frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{P_{\Sigma i} \cdot l_i}{A_i} + \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i$$

Равенката може да се реши само ако се воведуваат некои дополнителни услови, како на пример $A_1 = A_2, = \ldots = A_n = A$.

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = \frac{1}{\sigma \cdot A \cdot U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{\Sigma i} \cdot l_i + \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i$$

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i = \frac{1}{\sigma \cdot A \cdot U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{\Sigma i} \cdot l_i$$

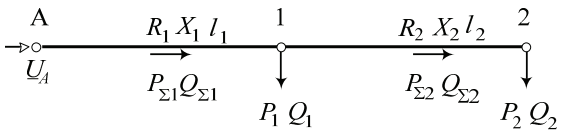
$$A \geq \frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{\Sigma i} \cdot l_i$$

Натаму за A го усвојуваме најблискиот стандарден пресек и потоа за него вршиме проверка на вистинската загуба на напон, а по потреба и негова корекција.

Димензионирање според критериумот на константна густина на струјата

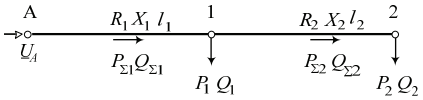
- Во почетните делници струјата е поголема од струјата во крајните делници. За да се искористи металот во спроводниците што е можно порационално, треба почетните делници да бидат со поголем пресек, додека крајните делници со помал пресек.
- Во низа случаи, како дополнителен услов при изборот на пресеците на спроводниците, се зема еднаквоста на густините на струите во сите секции од водот

$$J_1 = J_2 = \ldots = J_n.$$



$$\Delta U = \frac{1}{U_\mathrm{n}} \cdot \left[(P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1) + (P_{\Sigma 2} \cdot R_2 + Q_{\Sigma 2} \cdot X_2) \right].$$

Димензионирање според критериумот на константна густина на струјата



$$P_{\Sigma 1} = \sqrt{3} \cdot U_\mathrm{n} \cdot I_{\Sigma 1} \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1}, \qquad P_{\Sigma 2} = \sqrt{3} \cdot U_\mathrm{n} \cdot I_{\Sigma 2} \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2},$$

$$J_1 = \frac{I_{\Sigma 1}}{A_1}, \qquad J_2 = \frac{I_{\Sigma 2}}{A_2},$$

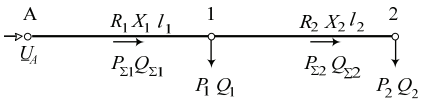
$$\frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1}{U_\mathrm{n}} = \sqrt{3} \cdot I_{\Sigma 1} \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} \cdot \frac{l_1}{\sigma_1 \cdot A_1},$$

$$\frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2}{U_\mathrm{n}} = \sqrt{3} \cdot I_{\Sigma 2} \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2} \cdot \frac{l_2}{\sigma_2 \cdot A_2},$$

за $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ имаме

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3}}{\sigma} \cdot (J_1 \cdot l_1 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} + J_2 \cdot l_2 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2}) + \frac{1}{U_\mathrm{n}} \cdot \sum_{i=1}^{2} Q_{\Sigma i} \cdot X_i$$

Димензионирање според критериумот на константна густина на струјата



$$\Delta U = \frac{\sqrt{3}}{\sigma} \cdot (J_1 \cdot l_1 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} + J_2 \cdot l_2 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2}) + \frac{1}{U_\mathrm{n}} \cdot \sum_{i=1}^{2} Q_{\Sigma i} \cdot X_i$$

При $J_1 = J_2 = J_{\mathrm{const.}}$ и $\Delta U = \Delta U_{\text{дозв.}}$ имаме

$$\frac{\sqrt{3}}{\sigma} \cdot J_{\mathrm{const.}} \cdot (l_1 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} + l_2 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2}) =$$

$$= \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{1}{U_\mathrm{n}} \cdot \sum_{i=1}^{2} Q_{\Sigma i} \cdot X_i \equiv \Delta U_{\text{а.дозв.}}$$

$$J_{\mathrm{const.}} = \frac{\sigma \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}}{\sqrt{3} \cdot (l_1 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} + l_2 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2})}$$

Димензионирање според критериумот на константна густина на струјата

Во случај кога мрежата напојува n потрошувачи ќе биде

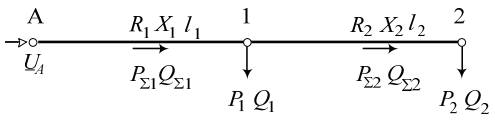
$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{1}{U_{\text{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot X_i,$$

$$J_{\text{const.}} = \frac{\sigma \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}}{\sqrt{3} \cdot \sum\limits_{i=1}^{n} l_i \cdot \cos\varphi_{\Sigma i}}$$

$$A_i = \frac{I_{\Sigma i}}{J_{\text{const.}}}, \quad (i = 1, 2, \ldots, n),$$

Пресеците се заокружуваат на најблиските стандардни пресеци. Потоа се пресметува вистинската загуба на напон во мрежата со точните вредности за R и X и се проверува условот $\Delta U \leq \Delta U_{\text{дозв.}}$. По потреба се врши корекција на пресеците.

Димензионирање според критериумот на минимална потрошувачка на материјал



$$\Delta U_{\text{a1}} = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1}{U_{\text{n}}} = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot A_1}, \quad \Delta U_{\text{a2}} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2}{U_{\text{n}}} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot A_2},$$

$$A_1 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot \Delta U_{\text{a1}}}, \quad A_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot \Delta U_{a2}}.$$

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} \equiv \Delta U_{\text{a1}} + \Delta U_{\text{a2}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{1}{U_{\text{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{2} Q_{\Sigma i} \cdot X_i$$

$$\Delta U_{a2} = \Delta U_{\text{а.дозв.}} - \Delta U_{a1},$$

$$A_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot (\Delta U_{\text{а.дозв.}} - \Delta U_{\text{a1}})}$$

Димензионирање според критериумот на минимална потрошувачка на материјал

Волуменот на употребениот материјал (за една фаза)

$$V = A_1 \cdot l_1 + A_2 \cdot l_2 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1^2}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot \Delta U_{\text{a1}}} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2^2}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot (\Delta U_{\text{а.дозв.}} - \Delta U_{\text{a1}})}$$

Волуменот V е зависен само од променливата ΔU_{a1}

$$\frac{dV}{d(\Delta U_{a1})} = 0$$

$$-\frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1^2}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot \Delta U_{\text{a1}}^2} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2^2}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot (\Delta U_{\text{а.дозв.}} - \Delta U_{\text{a1}})^2} = 0$$

$$\frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1^2}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot \Delta U_{\text{a1}}^2} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2^2}{\sigma \cdot U_{\text{n}} \cdot \Delta U_{\text{a2}}^2}$$

$$\frac{A_1^2}{P_{\Sigma 1}} = \frac{A_2^2}{P_{\Sigma 2}}$$

$$A_2 = A_1 \cdot \sqrt{\frac{P_{\Sigma 2}}{P_{\Sigma 1}}}$$

Димензионирање според критериумот на минимална потрошувачка на материјал

Пресеците A_1 и A_2 ќе ги добиеме од условот

$$\frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A_1} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A_2} = \Delta U_{\text{а.дозв.}}$$

$$\frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A_1} \cdot \left(P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + l_2 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1} \cdot P_{\Sigma 2}}\right) = \Delta U_{\text{а.дозв.}},$$

$$A_1 = \frac{\sqrt{P_{\Sigma 1}}}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \left(l_1 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1}} + l_2 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 2}}\right),$$

$$A_2 = \frac{\sqrt{P_{\Sigma 2}}}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \left(l_1 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1}} + l_2 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 2}}\right).$$

Димензионирање според критериумот на минимална потрошувачка на материјал

За мрежата од n делници имаме

$$\frac{A_1^2}{P_{\Sigma 1}} = \frac{A_2^2}{P_{\Sigma 2}} = \cdots = \frac{A_n^2}{P_{\Sigma n}} = \mathrm{const.}$$

$$A_k = \frac{\sqrt{P_{\Sigma k}}}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}, \quad k = 1, 2, \cdots, n,$$

$$A_k = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma k}}, \quad k = 1, 2, \cdots, n,$$

каде што е

$$k_P = \frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}.$$

Пресеците се заокружуваат на најблиските стандардни пресеци. Потоа се пресметува вистинската загуба на напон во мрежата со точните вредности за R и X и се проверува условот $\Delta U \leq \Delta U_{\text{дозв.}}$. По потреба се врши корекција на пресеците.

Економска густина на струјата

- Од пресекот на поедините делници од мрежата зависат вкупните трошоци за изградбата и експлоатацијата на самата мрежа.
- Зголемувањето на пресеците значи зголемување на трошоците за инвестиции и зголемување на делот од погонските трошоци за одржување и амортизација на мрежата, но во исто време ќе значи и намалување на трошоците за загуби на моќност и енергија – и обратно.
- За секоја делница од мрежата постои пресек за којшто вкупните трошоци за мрежата ќе бидат најмали. Тој пресек се нарекува економски пресек на спроводниците A_{ek}, а густината на струјата што му соодветствува на економскиот пресек се нарекува економска густина на струјата J_{ek}.
- A_{ek} и J_{ek} зависат на сложен начин од цените на материјалите, цената на електричната енергија, од големината на употребното време T_{M} и др. Детали може да се видат во 9 глава од учебникот.

Економска густина на струјата

Економска густина на струјата J_{ek} (A/mm^2)			
Спроводник или кабел	$1000 < T_{\mathrm{M}} \leq 3000$	$3000 < T_{\mathrm{M}} \leq 5000$	$T_{\mathrm{M}} > 5000$
Голи спроводници и собирници			
од бакар	2,5	2,1	1,8
од алуминиум или Al/Fe-јажиња	1,3	1,1	1,0
Кабли со изолација од PVC и од импрегнирана хартија (IP, NP)			
од бакар	3,0	2,5	2,0
од алуминиум	1,6	1,4	1,2
Кабли со изолација од гума (G), полиетилен (PE) или вмрежен полиетилен (XLPE)			
од бакар	3,5	3,1	2,7
од алуминиум	1,9	1,7	1,6

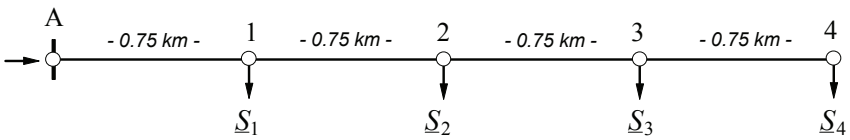
Пример 1

На сликата е прикажан 10 kV кабелски извод кој треба да биде изведен со кабли од типот XHP 48 A, 10 kV со спроводници од алуминиум (σ = 32 S·mm^2/m). Податоците за подолжните параметри r и x како и податоците за трајно дозволените струи I_d на овие кабли, во зависност од нивниот пресек A, се дадени во табелата. Да се изврши димензионирање на изводот според критериумите на:

а) константен пресек,

б) константна густина на струјата и

в) минимална потрошувачка на материјал.



$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 = \underline{S}_3 = \underline{S}_4 = \underline{S} = (600 + j250)\ \mathrm{kVA}.$$

Пример 1

Податоци за подолжните параметри на предвидените кабелски водови

A (mm^2)	16	25	35	50	70	95	120	150
r (Ω/km)	2,003	1,282	0,866	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206
x (Ω/km)	0,136	0,131	0,126	0,121	0,116	0,112	0,108	0,105
I_d (A)	85	130	155	180	225	270	305	340

Пример 1

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = 4 \cdot \underline{S} = (2,4 + j1,0)\text{MVA} = 2,6\angle 22,62^\circ \text{ MVA},$$
$$I_{\Sigma 1} = S_{\Sigma 1}/(\sqrt{3} \cdot U_\text{n}) = 150 \text{ A}.$$
$$\underline{S}_{\Sigma 2} = 3 \cdot \underline{S} = (1,8 + j0,75) \text{ MVA} = 1,95\angle 22,62^\circ \text{ MVA},$$
$$I_{\Sigma 2} = S_{\Sigma 2}/(\sqrt{3} \cdot U_\text{n}) = 112,5 \text{ A}.$$
$$\underline{S}_{\Sigma 3} = 2 \cdot \underline{S} = (1,2 + j0,5) \text{ MVA} = 1,3\angle 22,62^\circ \text{ MVA},$$
$$I_{\Sigma 3} = S_{\Sigma 3}/(\sqrt{3} \cdot U_\text{n}) = 75 \text{ A}.$$
$$\underline{S}_{\Sigma 4} = \underline{S} = (0,6 + j0,25) \text{ MVA} = 0,65\angle 22,62^\circ \text{ MVA},$$
$$I_{\Sigma 4} = S_{\Sigma 4}/(\sqrt{3} \cdot U_\text{n}) = 37,5 \text{ A}.$$

$$\Delta U_{\text{дозв.}} = 0,03 \cdot U_n = 0,3 \text{ kV}.$$

Од табелата гледаме важи $0,105 \leq x \leq 0,136\ \Omega/\text{km}$ и усвојуваме $x = 0,12\ \Omega/\text{km}$.

Пример 1

$$\Delta U_\text{r} = \frac{x}{U_\text{n}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot l_i =$$
$$= \frac{0,12}{10} \cdot (1,0 \cdot 0,75 + 0,75 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 0,75 + 0,25 \cdot 0,75) = 0,0225 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = U_{\text{дозв.}} - \Delta U_\text{r} = 0,3 - 0,0225 = 0,2775 \text{ kV}.$$

Пример 1 – константен пресек

$$A \geq \frac{\sum_{i=1}^{4} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\sigma \cdot U_\text{n} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} = \frac{(2,4 + 1,8 + 1,2 + 0,6) \cdot 0,75 \cdot 10^9}{32 \cdot 10 \cdot 0,2775 \cdot 10^6} = 50,7 \text{ mm}^2.$$

Усвојуваме $A = 50 \text{ mm}^2$, $\underline{z} = r + jx = (0,641 + j0,121)\ \Omega/\text{km}$.

$$\Delta U = r \cdot \frac{\sum_{i=1}^{4} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{U_\text{n}} + x \cdot \frac{\sum_{i=1}^{4} Q_{\Sigma i} \cdot l_i}{U_\text{n}} =$$
$$= 0,641 \cdot \frac{4,5}{10} + 0,121 \cdot \frac{1,875}{10} = 0,311 \text{ kV}.$$

Бидејќи е $\Delta U > \Delta U_{\text{дозв.}}$, го усвојуваме следниот поголем пресек $A = 70 \text{ mm}^2$, $\underline{z} = (0,443 + j0,116)\ \Omega/\text{km}$.
Новата проверка дава $\Delta U = 0,221 \text{ kV} < \Delta U_{\text{дозв.}}$.

Пример 1 – константна густина на струјата

$$J_{\text{const.}} = \frac{\sigma \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}}{\sqrt{3} \cdot \sum\limits_{i=1}^{4} l_i \cdot \cos\varphi_{\Sigma i}} = \frac{32 \cdot 0,2775}{\sqrt{3} \cdot 2,769} = 1,85\ \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}.$$

$$\cos\varphi_{\Sigma i} = \cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{600}{\sqrt{600^2 + 250^2}} = 0,923;$$

$$\sum_{i=1}^{4} l_i \cdot \cos\varphi_{\Sigma i} = 0,923 \cdot 3 = 2,769\ \text{km}.$$

$$A_1 = \frac{I_{\Sigma 1}}{J_{\text{const.}}} = \frac{150}{1,85} = 81\ \text{mm}^2,$$
$$A_2 = \frac{I_{\Sigma 2}}{J_{\text{const.}}} = \frac{112,5}{1,85} = 69\ \text{mm}^2,$$
$$A_3 = \frac{I_{\Sigma 3}}{J_{\text{const.}}} = \frac{75}{1,85} = 40,5\ \text{mm}^2,$$
$$A_4 = \frac{I_{\Sigma 4}}{J_{\text{const.}}} = \frac{37,5}{1,85} = 20\ \text{mm}^2.$$

Пример 1 – константна густина на струјата

- Прва делница: $A_1 = 95\ \text{mm}^2$; $r_1 = 0,320\ \Omega/\text{km}$; $x_1 = 0,112\ \Omega/\text{km}$.
- Втора делница: $A_2 = 50\ \text{mm}^2$; $r_2 = 0,641\ \Omega/\text{km}$; $x_2 = 0,121\ \Omega/\text{km}$.
- Трета делница: $A_3 = 35\ \text{mm}^2$; $r_3 = 0,866\ \Omega/\text{km}$; $x_3 = 0,126\ \Omega/\text{km}$.
- Четврта делница: $A_4 = 25\ \text{mm}^2$; $r_4 = 1,282\ \Omega/\text{km}$; $x_4 = 0,131\ \Omega/\text{km}$.

Се разбира дека се можни и други начини на заокружување. Во принцип, кога начинот на заокружување не е јасно видлив (како во овдешниот случај) правилно би било почетните делници да се заокружуваат нагоре додека последните делници да се заокружуваат надолу.

Пример 1 – константна густина на струјата

$$\Delta U = \frac{\sum\limits_{i=1}^{4} (P_{\Sigma i} r_i + Q_{\Sigma i} x_i) \cdot l_i}{U_{\text{n}}} = 66 + 92 + 82 + 60 = 300\ \text{V}; \quad (\Delta U\% = 3\%).$$

Значи усвоените пресеци задоволуваат. Но доколку не беше исполнет условот $\Delta U\% \leq 3\%$, тогаш вториот пресек, којшто беше заокружен надолу, ќе го зголемевме на 70 mm^2.

Пример 1 – минимум материјал

$$\frac{A_1^2}{P_{\Sigma 1}} = \frac{A_2^2}{P_{\Sigma 2}} = \cdots = \frac{A_n^2}{P_{\Sigma n}} = k_P = \text{const.}$$

$$A_k = \frac{1000 \cdot \sqrt{P_{\Sigma k}}}{\sigma \cdot U_\text{n} \cdot \Delta U_\text{а.дозв.}} \cdot \sum_{i=1}^{n} l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}; \quad k = 1, 2, \ldots, n.$$

$$\Delta U_\text{а.дозв.} = \Delta U_\text{дозв.} - \Delta U_\text{r} = 0,3 - 0,0225 = 0,2775\,\text{kV},$$

$$\sum_{i=1}^{4n} l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}} = 0,75 \cdot \sqrt{2,4} + 0,75 \cdot \sqrt{1,8} + 0.75 \cdot \sqrt{1,2} + 0,75 \cdot \sqrt{0,6} =$$

$$= 4,5\,\text{km} \cdot (\text{MW})^{1/2}.$$

$$k_P = \frac{1000}{\sigma \cdot U_\text{n} \cdot \Delta U_\text{а.дозв.}} \sum_{i=1}^{n} l_i \sqrt{P_{\Sigma i}} = \frac{1000}{32 \cdot 10 \cdot 0,2775} \cdot 4,5 = 40,2\,\frac{\text{mm}^2}{\text{MW}^{1/2}}.$$

Пример 1 – минимум материјал

$$A_1 = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1}} = 40,2 \cdot \sqrt{2,4} = 62,3\,\text{mm}^2,$$
$$A_2 = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma 2}} = 40,2 \cdot \sqrt{1,8} = 53,9\,\text{mm}^2,$$
$$A_3 = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma 3}} = 40,2 \cdot \sqrt{1,2} = 44,0\,\text{mm}^2,$$
$$A_4 = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma 4}} = 40,2 \cdot \sqrt{0,6} = 31,1\,\text{mm}^2.$$

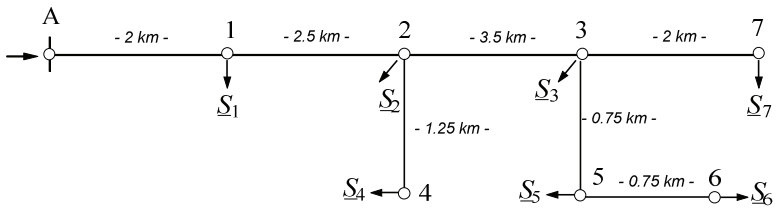
– Прва делница: $A_1 = 70\,\text{mm}^2$; $r_1 = 0,443\,\Omega/\text{km}$; $x_1 = 0,116\,\Omega/\text{km}$.
– Втора делница: $A_2 = 50\,\text{mm}^2$; $r_2 = 0,641\,\Omega/\text{km}$; $x_2 = 0,121\,\Omega/\text{km}$.
– Трета делница: $A_3 = 50\,\text{mm}^2$; $r_3 = 0,641\,\Omega/\text{km}$; $x_3 = 0,121\,\Omega/\text{km}$.
– Четврта делница: $A_4 = 35\,\text{mm}^2$; $r_4 = 0,866\,\Omega/\text{km}$; $x_4 = 0,126\,\Omega/\text{km}$.

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^{4} (P_{\Sigma i} \cdot r_i + Q_{\Sigma i} \cdot x_i) \cdot l_i}{U_\text{n}} = 88 + 93 + 62 + 41 = 284\,\text{V},$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_\text{n}} \cdot 100 = 2,84\% < \Delta U_\text{дозв.}$$

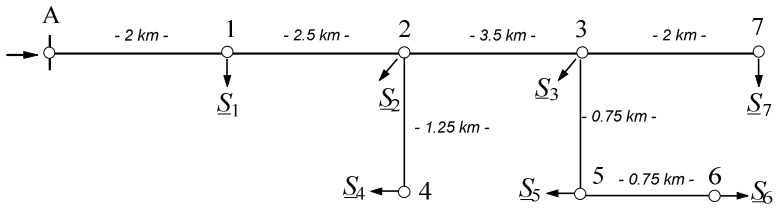
Димензионирање на разгранети дистрибутивни мрежи

Претходните модели за димензионирање на радијалните дистрибутивни мрежи се однесуваа на т.н. „магистрални“ мрежи кај кои потрошувачите се приклучени директно на магистралниот вод, нарекуван уште и *„фидер“*. Но во практиката се среќаваме и со разгранети дистрибутивни мрежи кај кои покрај фидерот постојат и т.н. *„отцепи“*, како што е тоа, на пример, случајот со мрежата прикажана на сликата. Во таквите случаи релациите изложени во точките 7.1, 7.2 и 7.3 не ќе може директно да се применуваат и тогаш се постапува на начин како што е тоа објаснето во следниот пример.



Пример 2

На сликата е прикажана 10 kV разгранета кабелска мрежа, која треба да биде изведена со кабли од типот IPO 13 A 10 kV со спроводници од алуминиум ($\sigma = 32\ \mathrm{Smm^2/km}$). Податоците за подолжните параметри r и x како и податоците за трајно дозволените струи I_d на овие кабли, во зависност од нивниот пресек A, се дадени во табелата. Да се изврши димензионирање на мрежата според критериумот на константен пресек. Да се користат само пресеците што се дадени во табелата. Дозволената загуба на напон изнесува $\Delta U_{\text{дозв.}} = 5\%$.



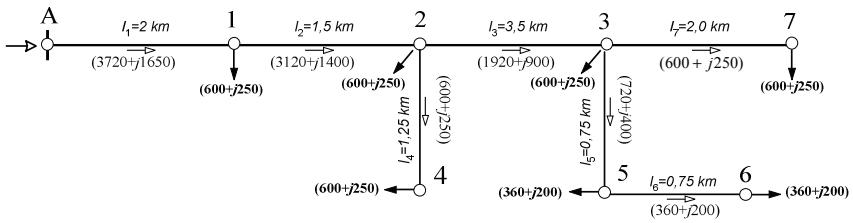
Должините на поедините секции од мрежата, изрзени во (km) се прикажани на самата слика. Моќностите на потрошувачите, изразени во (kVA), се како што следува:

Пример 2

Податоци за параметрите на предвидените кабелски водови тип IPO 13 A

$A\,(\mathrm{mm^2})$	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
$r\,(\Omega/\mathrm{km})$	2,003	1,282	0,866	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206	0,169	0,130
$x\,(\Omega/\mathrm{km})$	0,109	0,103	0,098	0,093	0,088	0,085	0,082	0,080	0,078	0,076
$I_d\,(\mathrm{A})$	69	89	110	130	165	195	225	255	285	325
$S_d\,(\mathrm{kVA})$	1195	1542	1905	2252	2858	3377	3897	4417	4936	5629

Пример 2



Магистралата е низа од гранки што се наоѓа на патеката од А до точката којашто е „електрички“ најоддалечена од „А“. Такви периферни точки во мрежата се 4, 6 и 7. Ако со ω_k го означиме множеството на гранки на патеката помеѓу напојната точка „А“ и крајната точка k, тогаш трите можни магистрали на мрежата се дефинирани со следните низи од гранки

$$\omega_4 = \{1, 2, 4\}; \quad \omega_6 = \{1, 2, 3, 5, 6\}; \quad \omega_7 = \{1, 2, 3, 7\}.$$

Пример 2

Нека сите делници имаат исти параметри $\underline{z} = r + jx$.

$$\Delta U_{\mathrm{A}-k} \approx \mathrm{Re}\left\{\sum_{i\in\omega_k} \frac{\underline{Z}_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}}{\underline{U}^*_i}\right\} \approx \mathrm{Re}\left\{\underline{z} \cdot \sum_{i\in\omega_k} \frac{l_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}}{\underline{U}^*_i}\right\} \approx \mathrm{Re}\left\{\frac{\underline{z}}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot \sum_{i\in\omega_k} l_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}\right\}.$$

каде со ω_k е означено множеството гранки на патеката помеѓу А и k, $\underline{S}_{\Sigma_i}$ е привидната моќност во i-тата гранка.

Јасно е дека напонот ќе биде најмал во онаа точка за која $\mathrm{Re}\left\{\sum\limits_{i\in\omega_k} l_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}\right\}$ е најголемо. Кога потрошувачите имаат ист (или приближно ист) $\cos\varphi$ наместо со производите $l_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}$ може да се оперира и со производите $l_i \cdot P_{\Sigma i}$.

$$\Sigma_{\omega 4} = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 4} \cdot l_4 = 12870\,\mathrm{kW} \cdot \mathrm{km};$$
$$\Sigma_{\omega 6} = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 3} \cdot l_3 + P_{\Sigma 5} \cdot l_5 + P_{\Sigma 6} \cdot l_6 = 19650\,\mathrm{kW} \cdot \mathrm{km};$$
$$\Sigma_{\omega 7} = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 3} \cdot l_3 + P_{\Sigma 7} \cdot l_7 = 20040\,\mathrm{kW} \cdot \mathrm{km}.$$

Значи магистралата е дефинирана со множеството гранки $\omega_7 = \{1, 2, 3, 7\}$.

Пример 2 – димензионирање на магистралата

Врз основа на податоците од табелата заклучуваме просечно е $x = 0,09\ \Omega/\mathrm{km}$.

$$\begin{aligned}
\Delta U_{\mathrm{r}} &= \sum_{i\in\omega_7} \frac{Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_{\mathrm{n}}} \approx \frac{x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i\in\omega_7} Q_{\Sigma i} \cdot l_i = \\
&= \frac{0,09}{10} \cdot (1650 \cdot 2 + 1400 \cdot 1,5 + 900 \cdot 3,5 + 250 \cdot 2,0) = \\
&= \frac{0,09}{10} \cdot 9050 = 81,5\ \mathrm{V}. \\
\Delta U_{\text{дозв.}} &= \frac{\Delta U_{\text{дозв.}}\%}{100} \cdot U_{\mathrm{n}} = \frac{5}{100} \cdot 10 = 0,5\ \mathrm{kV} = 500\ \mathrm{V}. \\
\Delta U_{\text{а.дозв.}} &= \Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{r}} = 500 - 81,5 = 418,5\ \mathrm{V} = 0,4185\ \mathrm{kV}.
\end{aligned}$$

$$A \geq \frac{1000 \cdot \sum\limits_{i\in\omega_7} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} = \frac{1000 \cdot 20040}{32 \cdot 10 \cdot 418,5} = 149,6\ \mathrm{mm}^2.$$

Усвојуваме е $A = 150\ \mathrm{mm}^2$, $r = 0,206\ \Omega/\mathrm{km}$, $x = 0,08\ \Omega/\mathrm{km}$.

Пример 2 – димензионирање на магистралата

$$\begin{aligned}
\Delta U = \Delta U_{\mathrm{A}-7} &= \frac{r}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i\in\omega_7} P_{\Sigma i} \cdot l_i + \frac{x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i\in\omega_7} Q_{\Sigma i} \cdot l_i = \\
&= \frac{0,206}{10} \cdot 20040 + \frac{0,08}{10} \cdot 9050 = 485\ \mathrm{V} < 500\ \mathrm{V}.
\end{aligned}$$

Пример 2 – димензионирање на отцепите

Прво ги пресметуваме загубите на напон ΔU_{A-2} и ΔU_{A-3} до точките 2 и 3 коишто се напојни точки за отцепите (2-4) и (3-5-6).

$$\Delta U_{\mathrm{A}-1} = \Delta U_1 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot r + Q_{\Sigma 1} \cdot x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_1 = \frac{3720 \cdot 0,206 + 1650 \cdot 0,08}{10} \cdot 2 = 180\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{1-2} = \Delta U_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot r + Q_{\Sigma 2} \cdot x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_2 = \frac{3120 \cdot 0,206 + 1400 \cdot 0,08}{10} \cdot 1,5 = 113\ \mathrm{V}$$

$$\Delta U_{2-3} = \Delta U_3 = \frac{P_{\Sigma 3} \cdot r + Q_{\Sigma 3} \cdot x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_3 = \frac{1920 \cdot 0,206 + 900 \cdot 0,08}{10} \cdot 3,5 = 164\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{\mathrm{A}-2} = \Delta U_{\mathrm{A}-1} + \Delta U_{1-2} = 180 + 113 = 293\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{\mathrm{A}-3} = \Delta U_{\mathrm{A}-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} = 180 + 113 + 164 = 457\ \mathrm{V}.$$

$$\Delta U_{1.\text{ост.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{A}-2} = 500 - 293 = 207\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{2.\text{ост.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{A}-3} = 500 - 457 = 43\ \mathrm{V}.$$

Пример 2 – отцеп 1

$$\Delta U_{\mathrm{r}.1} = \frac{l_4}{U_{\mathrm{n}}} \cdot Q_{\Sigma 4} \cdot x = \frac{1,25}{10} \cdot 250 \cdot 0,09 = 2,8\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{1\text{а.дозв.}} = \Delta U_{1.\text{ост}} - \Delta U_{1.\mathrm{r}} = 207 - 2,8 = 204,2\ \mathrm{V},$$

$$A_4 \geq \frac{1000 \cdot P_{\Sigma 4} \cdot l_4}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{1\text{а.дозв.}}} = \frac{1000 \cdot 600 \cdot 1,25}{32 \cdot 10 \cdot 204,2} = 11,5\ \mathrm{mm}^2.$$

Усвојуваме стандарден пресек $A_4 = 16\ \mathrm{mm}^2$ (иако кај 10 kV мрежи не се усвојуваат толку мали пресеци). За овој пресек важи $\underline{z}_4 = (2,003 + j0,109)\ \Omega/\mathrm{km}$.

$$\Delta U_4 = \Delta U_{2-4} = \frac{P_{\Sigma 4} \cdot r_4 + Q_{\Sigma 4} \cdot x_4}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_4 = \frac{600 \cdot 2,003 + 250 \cdot 0,109}{10} \cdot 1,25 =$$

$$= 192\ \mathrm{V} < 204,2\ \mathrm{V}.$$

Пример 2– отцеп 2

$$\Delta U_{2a.\text{дозв.}} = \Delta U_{2.\text{ост.}} - \Delta U_{2.\mathrm{r}} = 43 - 3,6 = 39,4\ \mathrm{V}$$

$$A_5 = A_6 = 70\ \mathrm{mm}^2; \quad \underline{z}_5 = (0,443 + j0,088)\ \Omega/\mathrm{km}.$$

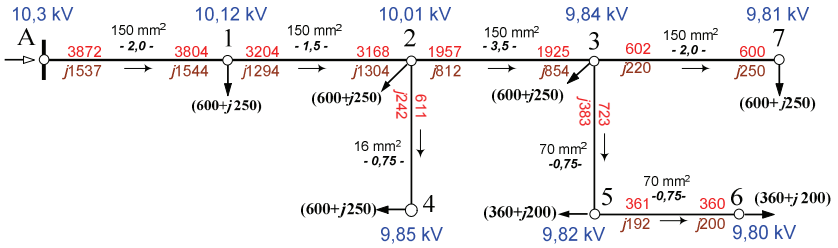
$$\Delta U_{3-5} = \Delta U_5 = 26,6\ \mathrm{V};$$

$$\Delta U_{5-6} = \Delta U_6 = 13,3\ \mathrm{V};$$

$$\Delta U_{3-6} = \Delta U_{3-5} + \Delta U_{5-6} = 26,6 + 13,3 = 39,9\ \mathrm{V}.$$

Пример 2

Со точни пресметки се гледа дека усвоените пресеци задоволуваат како во поглед на загубата на напон (таа е точно 5%), така и во поглед на дозволените струјни оптоварувања на каблите (исполнет е и термички критериум бидејќи струите/моќностите низ гранките од мрежата се помали од дозволените).



Електрични мрежи

Загуби на моќност и енергија во електричните мрежи

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

Загуби на активна моќност во елементите на мрежата

- Во современите ЕЕС загубите на електрична енергија достигаат 10÷15% од вкупната произведена електрична енергија. Големината на овие загуби битно влијае врз вкупните годишни експлоатациони трошоци, а со тоа и врз цената на испорачаната електрична енергија.
- Загуби во водови

$$\Delta P_{\mathrm{V}} = 3 \cdot R \cdot I^2 = R \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = R \cdot \frac{S^2}{U^2}$$

- Загуби во трансформатори

$$\Delta P_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \left(\frac{S}{S_{\mathrm{n}}}\right)^2 = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \alpha^2 \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}}.$$

Вкупните загуби на моќност во една мрежа, во даден режим на работа, претставуваат збир од загубите на моќност во сите нејзини елементи.

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

- Моќностите на оптоварување P и Q се константни во временски период

$$\Delta W = \Delta P \cdot T$$

- Моќностите на оптоварување P и Q се временски променливи

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P(t) \cdot dt$$

$$\Delta W_{\mathrm{V}} = \int_0^T \Delta P_{\mathrm{V}}(t) \cdot dt = \int_0^T 3 \cdot R \cdot I^2(t) \cdot dt = R \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{U^2(t)} \cdot dt$$

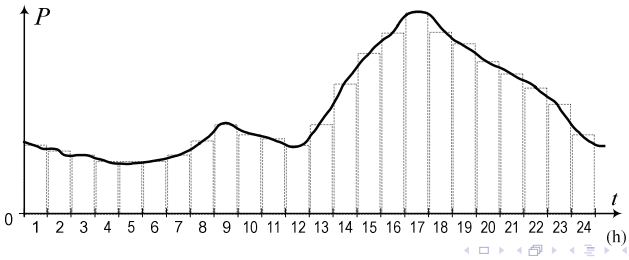
$$\Delta W_{\mathrm{T}} = \int_0^T \left[\Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{n}}^2}\right] \cdot dt = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot dt$$

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

Временски промени $P(t)$ и $Q(t)$ честопати се прикажуваат со скалеста крива со n временски интервали

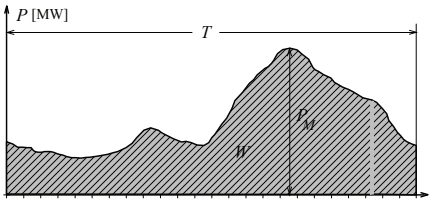
$$\Delta W_{\mathrm{V}} = R \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \cdot \Delta t_i = R \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i^2}{U_i^2} \cdot \Delta t_i, \quad U_i \approx U_{\mathrm{n}}$$

$$\Delta W_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i^2}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot \Delta t_i.$$

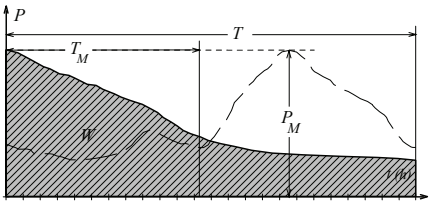


Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

$$W = \int_0^T P(t) \cdot dt$$



Дневен дијаграм $P = P(t)$



Подреден дневен дијаграм

T_{M} – употребно време или време на максимална моќност

$$T_{\mathrm{M}} = \frac{W}{P_{\mathrm{M}}} = \int_0^T \frac{P(t)}{P_{\mathrm{M}}} \cdot dt \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{P_{\mathrm{M}}} \cdot \Delta t_i$$

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

$$\Delta W_{\mathrm{V}} = R \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{U^2(t)} \cdot dt \approx \frac{R}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot S_{\mathrm{M}}^2 \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{M}}^2} \cdot dt$$

$$\Delta P_{\mathrm{M}} = 3 \cdot R \cdot I_{\mathrm{M}}^2 = R \cdot \frac{S_{\mathrm{M}}^2}{U_{\mathrm{M}}^2} \approx R \cdot \frac{S_{\mathrm{M}}^2}{U_{\mathrm{n}}^2}$$

$$\Delta W_V = \Delta P_M \cdot \tau$$

$$\tau = \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{M}}^2} \cdot dt \approx \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{S_i}{S_{\mathrm{M}}} \right)^2 \cdot \Delta t_i$$

τ се нарекува време на максимални загуби или време на загуби.

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

Времињата T_{M} и τ се однесуваат на еден ист дијаграм на оптоварување. Помеѓу нив постои врска опишана со емпириска релација

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\mathrm{M}}}{10.000}\right)^2 \cdot 8760, \quad \text{важи за } T = 8760\,\mathrm{h}$$

Други емпириски изрази врз основа на познатиот фактор на товарот $m = T_{\mathrm{M}}/T = P_{\text{ср.}}/P_{\mathrm{M}}$

$$\tau = (0,17 \cdot m + 0,83 \cdot m^2) \cdot T$$
$$\tau = (0,3 \cdot m + 0,7 \cdot m^2) \cdot T$$
$$\tau = (0,124 + 0,8760 \cdot m)^2 \cdot T$$

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

Водови

$$\Delta W_V = \Delta P_M \cdot \tau$$

Трансформатори

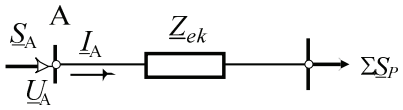
$$\Delta W_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot dt = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{S_{\mathrm{M}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{M}}^2} \cdot dt$$

$$\Delta W_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{S_{\mathrm{M}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot \tau$$

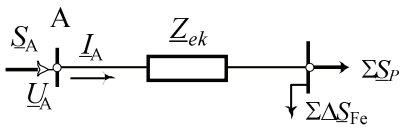
Вкупните загуби на активна и реактивна енергија во една мрежа, во даден период, претставуваат збир од загубите на активна и реактивна енергија во сите нејзини елементи, остварени во истиот тој период.

Метод на еквивалентна импеданција

- Со помош на „методот на еквивалентна импеданција“ е можно цела една мрежа, или пак дел од една постојна мрежа, заедно со нејзините потрошувачи, да се еквивалентира со друга, многу поедноставна мрежа.
- Една дистрибутивна мрежа составена само од водови може да се еквивалентира само со една единствена импеданција (слика 1)
- Кога мрежата содржи и трансформатори тогаш покрај импеданцијата еквивалентот ќе содржи и еден дополнителен фиктивен потрошувач со којшто се опфаќаат и загубите на железо во трансформаторите кои не зависат од оптоварувањето (слика 2)



а) Модел на мрежата составена само од водови



б) Модел кога мрежата содржи и трансформатори

Метод на еквивалентна импеданција

- Дистрибутивна мрежа со n_{GR} гранки со импеданции $\underline{Z}(i) = R(i) + jX(i);\ i = 1, 2, \ldots, n_{\mathrm{GR}}$.
- Ако во мрежата постојат и трансформатори нивните податоци се $S_{nT}(k)$, $\Delta P_{\mathrm{Cun}}(k)$, $\Delta P_{\mathrm{Fe}}(k)$ и $\Delta Q_{\mathrm{Fe}}(k)$.
- Со $\underline{I}_{\Sigma}(i);\ i = 1, 2, \ldots, n_{\mathrm{GR}}$ е означена струјата во гранката i.
- Со I_A е означена струјата во напојната точка А.

$$\Delta \underline{S}(i) = 3 \cdot \underline{Z}(i) \cdot I_{\Sigma}(i)^2 = 3 \cdot \underline{Z}(i) \cdot k_i^2 \cdot I_{\mathrm{A}}^2.$$

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{I}_{\Sigma}(i)}{\underline{I}_{\mathrm{A}}} = \frac{\underline{I}_{\Sigma}(i)}{\underline{I}_{\mathrm{A}}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{n}}} \approx \frac{\underline{S}^*_{\Sigma}(i)}{\underline{S}^*_{\mathrm{A}}}; \quad \Rightarrow \quad k_i^2 \approx \frac{S^2_{\Sigma}(i)}{S^2_{\mathrm{A}}}.$$

$$\Delta \underline{S} = \Delta \underline{S}_{\mathrm{var}} + \underline{S}_{\mathrm{const.}} = \underline{S}_{\mathrm{var}} + \Sigma \Delta \underline{S}_{\mathrm{Fe}}.$$

$$\Delta \underline{S}_{\mathrm{var}} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} \Delta \underline{S}(i) = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} 3 \cdot \underline{Z}(i) \cdot I^2_{\Sigma}(i) =$$

$$= 3 \cdot I^2_{\mathrm{A}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} \underline{Z}(i) \cdot \frac{I^2_{\Sigma}(i)}{I^2_{\mathrm{A}}} = 3 \cdot I^2_{\mathrm{A}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i).$$

Метод на еквивалентна импеданција

$$\Delta \underline{S}_{\mathrm{var}} = 3 \cdot I^2_{\mathrm{A}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i).$$

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i)$$

$\underline{Z}_{ek}$ зависи од параметрите на мрежата и од просторната и временска распределба на товарот – за различни режими на работа таа е различна.

$$\Delta \underline{S}_{\mathrm{var}} = 3 \cdot \underline{Z}_{ek} \cdot I^2_{\mathrm{A}}.$$

$$\Delta \underline{S} = \Delta \underline{S}_{\mathrm{var}} + \Delta \underline{S}_{\mathrm{const.}} = 3 \cdot \underline{Z}_{ek} \cdot I^2_{\mathrm{A}} + \Sigma \Delta \underline{S}_{\mathrm{Fe}}.$$

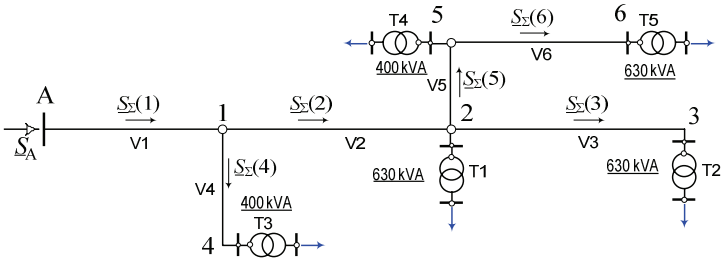
Метод на еквивалентна импеданција

За СН дистрибутивни мрежи кога не постојат податоци за конзумот се претпоставува дека учеството на моќноста на секој потрошувач од мрежата во сумарната моќност $\underline{S}_{\mathrm{A}}$ е пропорционално на инсталираната моќност на трансформаторот СН/НН преку којшто тој се напојува и е цело време константно.

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{S}_{\Sigma}(i)}{\underline{S}_{\mathrm{A}}} = \frac{\sum\limits_{j \in \omega_i} S_{\mathrm{nT}}(j)}{\sum S_{\mathrm{nT}}} = \mathrm{const}; \quad i = 1, 2, \ldots, n_{\mathrm{GR}}.$$

ΣS_{nT} е сумарната инсталирана моќност на сите трансформатори во мрежата, $S_{\mathrm{nT}}(j)$ е номиналната моќност на транформаторот j, ω_i е множеството од потрошувачи (трансформатори) коишто се напојуваат преку гранката i.

Пример 1



$$\sum S_{\mathrm{nT}} = 630 + 630 + 400 + 400 + 630 = 2690\,\mathrm{kVA},$$

$$k_1 = \frac{2690}{2690} = 1,000; \quad k_2 = \frac{2290}{2690} = 0,851; \quad k_3 = \frac{630}{2690} = 0,237;$$

$$k_4 = \frac{400}{2690} = 0,150; \quad k_5 = \frac{1030}{2690} = 0,387; \quad k_6 = \frac{630}{2690} = 0,237.$$

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i)$$

Пример 2

Група потрошувачи со вкупна моќност $\underline{S} = (1000 + 500)\,\mathrm{kVA}$ се напојува од една трансформаторска станица 10/0,4 kV/kV. Трансформацијата на електричната енергија се врши со три идентични, паралелно врзани трансформатори при што, нивниот број во групата може да се менува. Да се определи бројот на трансформаторите во погонот $n_{\text{опт.}}$ така што загубите на активна моќност ΔP во трансформацијата ќе бидат минимални.
Податоци: $U_{1n}/U_{2n} = 10/0,4\,\mathrm{kV/kV}$; $S_{\mathrm{n}} = 1000\,\mathrm{kVA}$; $\Delta P_{\mathrm{Cun}} = 13,5\,\mathrm{kW}$; $\Delta P_{\mathrm{Fe}} = 2,7\,\mathrm{kW}$; $u_k\% = 6\%$; $i_0\% = 2\%$.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1000^2 + 500^2} = 1118\,\mathrm{kVA},$$

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \left[\frac{S_{(1)}}{S_{\mathrm{n}}}\right]^2 = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n^2} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \left(\frac{S}{S_{\mathrm{n}}}\right)^2,$$

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{(1)} = n \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \left(\frac{S}{S_{\mathrm{n}}}\right)^2,$$

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2; \quad \alpha = \frac{S}{S_{\mathrm{n}}}.$$

Пример 2

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2$$

$$\frac{d(\Delta P)}{dn} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} - \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{\alpha^2}{n^2} = 0,$$

$$n_{\text{опт.}} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\mathrm{Cun}}}{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}} = \frac{S}{S_{\mathrm{n}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\mathrm{Cun}}}{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}}.$$

$$n_{\text{опт.}} = \frac{S}{S_{\mathrm{n}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\mathrm{Cun}}}{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}} = \frac{1118}{1000} \cdot \sqrt{\frac{13,5}{2,7}} = 2,5$$

за $n = 2$ добиваме

$$\Delta P_{(2)} = 2 \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + (1/2) \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2 = \\ = 2 \cdot 2,7 + (1/2) \cdot 13,7 \cdot 1,118^2 = 12,95\,\mathrm{kW},$$

за $n = 3$ добиваме

$$\Delta P_{(3)} = 3 \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + (1/3) \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2 = \\ = 3 \cdot 2,7 + (1/3) \cdot 13,7 \cdot 1,118^2 = 13,13\,\mathrm{kW}.$$

Заклучкот: треба да работат $n = 2$ трансформатора

Пример 3

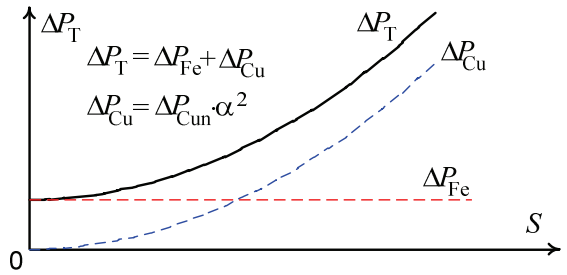
Во една дистрибутивна градска трансформаторска станица 35/10 kV/kV се инсталирани 4 идентични трансформатори кои можат да работат паралелно. Притоа бројот на трансформаторите во групата n може да се менува. Бидејќи дневниот дијаграм на оптоварувањето на трансформаторската станица е изразито нерамномерен, со цел да се зголеми економичноста на погонот во смисла на намалување на загубите на моќност и енергија во трансформацијата, бројот на единиците во погонот n ќе треба да се менува сообразно со сумарното оптоварување на трансформаторската станицата.

Да се утврди економичниот програм на вклучување (исклучување) на трансформаторските единици во групата во сообразност со оптоварувањето така што ќе се постигнат најмали загуби на активна моќност и енергија во трансформаторската станица.

Податоци: 35/10 kV/kV; 10 MVA; ΔP_{Cun} = 96 kW; ΔP_{Fe} = 30 kW; $u_k\%$ = 8% ; $i_0\%$ = 1,2%.

Пример 3

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_{\mathrm{Cu}} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \alpha^2 \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}}.$$

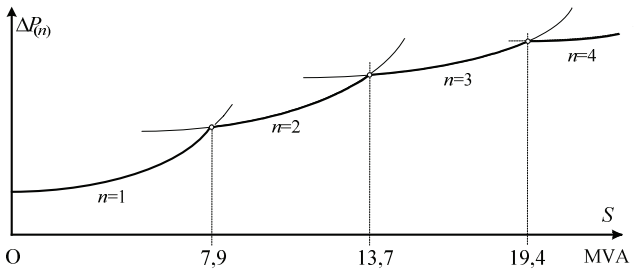


Пример 3

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \left(\frac{S}{S_{\mathrm{n}}}\right)^2 = n \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2.$$

$$\Delta P_{(n+1)} = (n+1) \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \left(\frac{S}{S_{\mathrm{n}}}\right)^2 = (n+1) \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2.$$

Од последните две равенства можеме да ја определиме привидната моќност на групата $S_{(n)}$ за која се постигнува условот $\Delta P_{(n)} = \Delta P_{(n+1)}$.



Пример 3

$$n \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \left[\frac{S_{(n)}}{S_{\mathrm{n}}}\right]^2 = (n+1) \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \left[\frac{S_{(n)}}{S_{\mathrm{n}}}\right]^2,$$

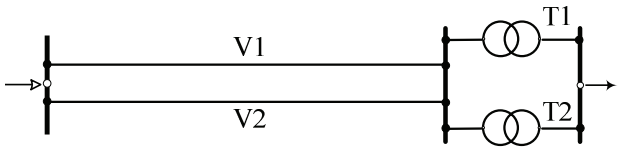
$$S_{(n)} = S_{\mathrm{n}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}{\Delta P_{\mathrm{Cun}}} \cdot n \cdot (n+1)}.$$

$$\frac{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}{\Delta P_{\mathrm{Cun}}} = \frac{30}{96} = 0,313.$$

$$S_{(1)} = 10 \cdot \sqrt{1 \cdot 2 \cdot 0,313} = 7,9\,\mathrm{MVA};$$
$$S_{(2)} = 10 \cdot \sqrt{2 \cdot 3 \cdot 0,313} = 13,7\,\mathrm{MVA};$$
$$S_{(3)} = 10 \cdot \sqrt{3 \cdot 4 \cdot 0,313} = 19,4\,\mathrm{MVA}.$$

Пример 4

На сликата е прикажана 35 kV мрежа, составена од два идентични 35 kV далекувода и два идентични трансформатора 35/10 kV/kV, кои работат во паралела. Системот напојува потрошувач (или поточно речено група потрошувачи) кој работи со константен фактор на моќност $\cos\varphi = 0,8$ = const. и со познат подреден годишен дијаграм на оптоварување, прикажан во табелата.



Период (h)	0 – 2000	2000 – 4000	4000 – 8760
P (MW)	10	5	2
Q (Mvar)	7,5	3,75	1,5
S (Mvar)	12,5	6,25	2,5

Да се определат загубите на привидната моќност $\Delta\underline{S} = \Delta P + j\Delta Q$ во режимот на максималното оптоварување како и вкупните годишни загуби на активна енергија ΔW во системот. Задачата да се реши приближно, така што зголемувањето на оптоварувањето на водовите поради загубите во трансформацијата ќе се занемари, а ќе се занемари и капацитивноста на водовите.
Водови V1 и V2: $\underline{z} = (0,28 + 0,43)\ \Omega/\mathrm{km}$; $l = 15\ \mathrm{km}$.
Трансформатори T1 и T2: $S_n = 7500\ \mathrm{kVA}$, 35/10,5 kV/kV, $\Delta P_{\mathrm{Cun}} = 75\ \mathrm{kW}$, $\Delta P_{\mathrm{Fe}} = 24\ \mathrm{kW}$, $u_k\% = 7,5\%$, $i_0\% = 3,5\%$.

Пример 4

$$S_{\mathrm{M}} = 12,5\,\mathrm{MVA}, \quad S'_{\mathrm{M}} = S_{\mathrm{M}}/2 = 6,25\,\mathrm{MVA}.$$
$$\Delta\underline{S}_{\Sigma} = 2 \cdot \Delta\underline{S}_{\mathrm{V}} + 2 \cdot \Delta\underline{S}_{\mathrm{T}} = 2 \cdot (\Delta P_{\mathrm{V}} + \Delta P_{\mathrm{T}}) + j2 \cdot (\Delta Q_{\mathrm{V}} + \Delta Q_{\mathrm{T}}).$$

$$\Delta\underline{S}_{\mathrm{V}} = \frac{S^2}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot (R_{\mathrm{V}} + jX_{\mathrm{V}}) = \frac{6,25^2}{35^2} \cdot (0,28 + j0,43) \cdot 15 = (0,134 + j0,206)\ \mathrm{MVA},$$

$$\Delta P_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2 = 24 + 25 \cdot (6,25/7,5)^2 = 76,1\ \mathrm{kW},$$
$$\Delta Q_{\mathrm{T}} = \Delta Q_{\mathrm{Fe}} + X_{\mathrm{T}} \cdot \frac{S^2}{U_{\mathrm{n}}^2} = (\frac{i_0\%}{100} + \frac{u_k\%}{100} \cdot \alpha^2) \cdot S_{\mathrm{n}} =$$
$$= \left(\frac{3,5}{100} + \frac{7,5}{100} \cdot \frac{6,25^2}{7,5^2}\right) \cdot 7500 = 653\ \mathrm{kvar},$$
$$\Delta\underline{S}_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{T}} + j\Delta Q_{\mathrm{T}} = (0,076 + 0,653)\ \mathrm{MVA}.$$

$$\Delta\underline{S}_{\Sigma} = 2 \cdot \Delta\underline{S}_{\mathrm{V}} + 2 \cdot \Delta\underline{S}_{\mathrm{T}} =$$
$$= 2 \cdot (0,134 + j0,206) + 2 \cdot (0,076 + j0,653) =$$
$$= (0,420 + j1,718)\ \mathrm{MVA}.$$

Пример 4

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot \Delta W_\mathrm{V} + 2 \cdot \Delta W_\mathrm{T},$$

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot \frac{S^2}{U_\mathrm{n}^2} \cdot R \cdot \tau + 2 \cdot \left(\Delta P_\mathrm{Fe} \cdot T + \Delta P_\mathrm{Cun} \cdot \frac{S^2}{S_\mathrm{n}^2} \cdot \tau \right).$$

$$\tau = \sum_{i=1}^{3} \frac{S_i^2}{S_\mathrm{M}^2} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^{3} \left(\frac{P_i / \cos\varphi_i}{P_\mathrm{M} / \cos\varphi_\mathrm{M}} \right)^2 \cdot \Delta t_i.$$

$$\tau = \sum \frac{P_i^2}{P_\mathrm{max}^2} \Delta t_i = \frac{12,5^2 \cdot 2000 + 6,25^2 \cdot 2000 + 2,5^2 \cdot 4760}{12,5^2} = 2650 \text{ h}.$$

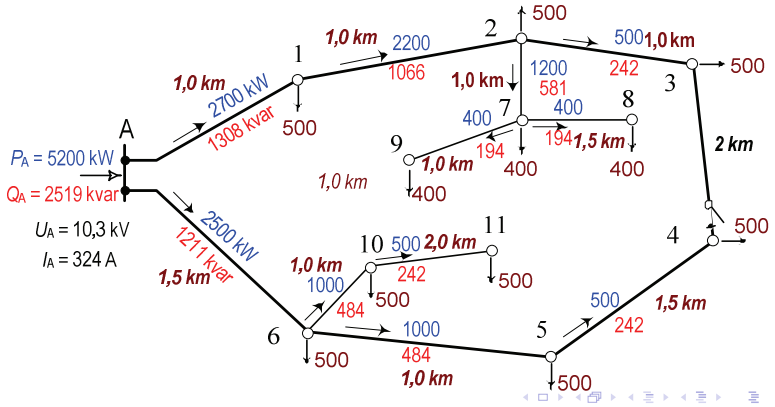
$$\Delta W_\mathrm{V} = \frac{6,25^2}{35^2} \cdot 4,2 \cdot 2650 = 355 \text{ MWh/годишно},$$

$$\Delta W_\mathrm{T} = 0,024 \cdot 8760 + 0,075 \cdot \left(\frac{6,25}{7,5} \right)^2 \cdot 2650 = 348 \text{ MWh/годишно}.$$

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot \Delta W_\mathrm{V} + 2 \cdot \Delta W_\mathrm{T} = 2 \cdot 355 + 2 \cdot 348 = 1406 \text{ MWh/годишно}.$$

Пример 5

Да се пресмета еквивалентната импеданција Z_{ek} на мрежата од примерот 5.4. Во пресметките да се користат резултатите за пресметаните токови на моќност во мрежата. Сите водови во мрежата се кабли од типот XHE 49 A $3 \times 1 \times 150$, 6/10 kV со ист пресек и исти подолжни параметри $\underline{z} = (0,208 + j0,092)\ \Omega/\mathrm{km}$.



Пример 5

$$\underline{S}_\mathrm{A} = (5200 + j2519) = 5778 \cdot e^{j25,9^\circ} \text{kVA}.$$

$$I_\mathrm{A} = \frac{S_\mathrm{A}}{\sqrt{3} \cdot U_\mathrm{A}} = \frac{5778}{\sqrt{3} \cdot 10} = 334 \text{ A}.$$

$$\underline{k}_1 = \frac{\underline{S}_\Sigma^*(1)}{\underline{S}_\mathrm{A}^*} = \frac{2700 - j1308}{5200 - j2519} = 0,51924 \cdot e^{j0^\circ}; \quad \left|\underline{k}_1^2\right| = 0,27,$$

$$\left|\underline{k}_1^2\right| \cdot \underline{Z}_1 = \left|\underline{k}_1^2\right| \cdot \underline{z} \cdot l_1 = 0,27 \cdot (0,208 + j0,092) \cdot 1 = 61,32 \cdot e^{j23,9^\circ} \text{m}\Omega;$$

$$\underline{k}_2 = \frac{\underline{S}_\Sigma^*(2)}{\underline{S}_\mathrm{A}^*} = \frac{2200 - j1066}{5200 - j2519} = 0,42301 \cdot e^{-j0,006^\circ}; \quad \left|\underline{k}_2^2\right| = 0,179,$$

$$\left|\underline{k}_2^2\right| \cdot \underline{Z}_2 = \left|\underline{k}_2^2\right| \cdot \underline{z} \cdot l_2 = 0,179 \cdot (0,208 + j0,092) \cdot 1 = 40,71 \cdot e^{j23,9^\circ} \text{m}\Omega;$$

Пример 5

број	Вод	l (km)	$P_{\Sigma i}$ (kW)	$Q_{\Sigma i}$ (kvar)	$\lvert \underline{k}_i^2 \rvert$	$\underline{Z}_i$ (Ω)	$\underline{Z}_i \cdot k_i^2$ (mΩ)
1	A – 1	1,0	2700	1308	0,270	0,208+j0,092	56,1+j24,8
2	1 – 2	1,0	2200	1066	0,179	0,208+j0,092	37,2+j16,5
3	2 – 3	1,0	500	242	0,009	0,208+j0,092	1,9+j0,9
4	2 – 7	1,0	1200	581	0,053	0,208+j0,092	11,1+j4,9
6	7 – 8	1,5	400	194	0,006	0,312+j0,138	1,8+j0,8
7	7 – 9	1,0	400	194	0,006	0,208+j0,092	1,2+j0,5
8	A – 6	1,5	2500	1211	0,231	0,312+j0,138	72,1+j31,9
9	6 – 5	1,0	1000	484	0,037	0,208+j0,092	7,7+j3,4
10	5 – 4	1,5	500	242	0,009	0,312+j0,138	2,9+j1,3
11	6 – 10	1,0	1000	484	0,037	0,208+j0,092	7,7+j3,4
12	10 – 11	2,0	500	242	0,009	0,416+j0,184	3,8+j1,7

Пример 5

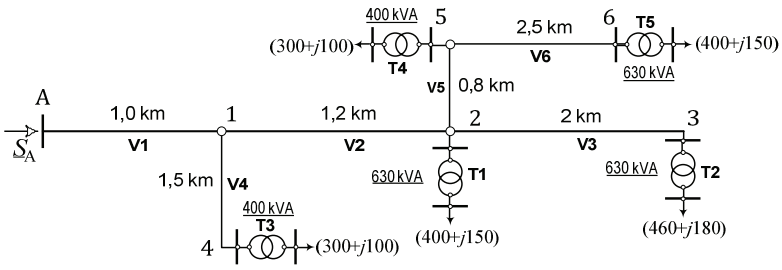
$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i) = (203,6 + j90,1)\ \mathrm{m\Omega} = 222,6 \cdot e^{j23,9^\circ}\ \mathrm{m\Omega}.$$

$$\Delta P_\Sigma = 3 \cdot R_{ek} \cdot I_{\mathrm{A}}^2 = 3 \cdot 0,2036 \cdot 334^2 = 68138\ \mathrm{W} = 68,138\ \mathrm{kW}.$$

За споредба, за истиот тој режим во примерот 5.4 се пресметани загуби на активна моќност (точна вредност) во износ $\Delta P_\Sigma = 65,85\ \mathrm{kW}$.

Пример 6

Се посматра еден извод од 10 kV надземна мрежа од којшто се напојуваат пет ТС СН/НН. Магистралниот дел од изводот А-1-2-3 е изведен со спроводници Al/Č 70/12 mm^2, $\underline{z}_1 = (0,46 + j0,35)\ \Omega/\mathrm{km}$ додека отцепите 1-4, 2-5 и 5-6 со спроводници Al/Č 35/6 mm^2 $\underline{z}_2 = (0,64 + j0,38)\ \Omega/\mathrm{km}$. Напонот во напојната точка е $U_{\mathrm{A}} = 10,3\ \mathrm{kV}$.



	S_{n} (kVA)	$U_{1\mathrm{n}}/U_{2\mathrm{n}}$ (kV/kV)	$u_k\%$	$i_0\%$	ΔP_{Cun} (kW)	ΔP_{Fe} (kW)	ΔQ_{Fe} (kvar)
1	630	10/0,4	4	1,8	6,5	1,30	11,34
2	400	10/0,4	4	2,0	4,6	0,93	8,0

Да се пресмета еквивалентната отпорност на мрежата и да се нацрта соодветната еквивалентна заменска шема.

Пример 6

$$\underline{Z} = R + jX = \underline{z} \cdot l,$$

$$R_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2}; \quad Z_{\mathrm{T}} = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}}; \quad X_{\mathrm{T}} = \sqrt{Z_{\mathrm{T}}^2 - R_{\mathrm{T}}^2};$$
$$\underline{Z}_{\mathrm{T}} = R_{\mathrm{T}} + jX_{\mathrm{T}}.$$

Коефициентите на учество $\underline{k}_i$ се добиваат приближно, како однос помеѓу моќноста $\underline{S}_{\Sigma}(i)$ што тече низ посматраната гранка i и сумарната моќност $\underline{S}_{\mathrm{A}}$

$$\Sigma\underline{S}_{\mathrm{P}} = (400 + j150) + (460 + j180) + (300 + j100) + (300 + j100) + (400 + j150),$$
$$\underline{S}_{\mathrm{A}} \approx \Sigma\underline{S}_{\mathrm{P}} = (1860 + j680)\ \mathrm{kVA}.$$

Според тоа, коефициентот $\underline{k}_5$ за 5-тата делница ќе биде

$$\underline{k}_5 = \frac{\underline{S}_{\Sigma}^*(5)}{\underline{S}_{\mathrm{A}}^*} = \frac{700 - j250}{1860 - j680} = 0,375 + j0,003,$$
$$k_5^2 = |\underline{k}_5|^2 = 0,375^2 + 0,003^2 = 0,141.$$

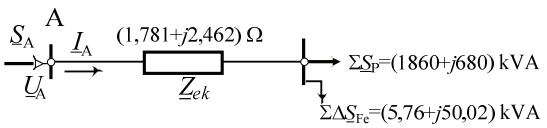
Пример 6

		$R(i)$ (Ω)	$X(i)$ (Ω)	$P_{\Sigma}(i)$ (kW)	$Q_{\Sigma}(i)$ (kvar)	Re$\{\underline{k}_i\}$	Im$\{\underline{k}_i\}$	k_i	k_i^2	$k_i^2 R(i)$ (Ω)	$k_i^2 X(i)$ (Ω)
1	V1	0,460	0,350	1860	680	1,000	0,000	1,000	1,000	0,460	0,350
2	V2	0,552	0,420	1560	580	0,840	0,005	0,840	0,706	0,390	0,297
3	V3	0,920	0,700	1160	430	0,625	0,003	0,625	0,390	0,359	0,273
4	V4	0,960	0,570	300	100	0,160	−0,005	0,160	0,025	0,024	0,015
5	V5	0,512	0,304	700	250	0,375	−0,003	0,375	0,141	0,072	0,043
6	V6	1,600	0,950	400	150	0,216	0,002	0,216	0,047	0,074	0,044
7	T1	1,638	6,134	400	150	0,216	0,002	0,216	0,047	0,076	0,285
8	T2	1,638	6,134	460	180	0,249	0,006	0,249	0,062	0,102	0,382
9	T3	2,875	9,578	300	100	0,160	−0,005	0,160	0,025	0,073	0,244
10	T4	2,875	9,578	300	100	0,160	−0,005	0,160	0,025	0,073	0,244
11	T5	1,638	6,134	400	150	0,216	0,002	0,216	0,047	0,076	0,285

$$\Sigma\Delta\underline{S}_{\mathrm{Fe}} = 2 \cdot (0,93 + j8,00) + 3 \cdot (1,3 + j11,34) = (5,76 + j50,02)\ \mathrm{kVA}.$$

$$R_{ek} = \sum_{i=1}^{11} |k_i|^2 \cdot R(i) = 1,781\ \Omega;$$
$$X_{ek} = \sum_{i=1}^{11} |k_i|^2 \cdot X(i) = 2,462\ \Omega;$$

Пример 6



$$\underline{S}_{ek} = \Sigma\underline{S}_{\mathrm{P}} + \Sigma\Delta\underline{S}_{\mathrm{Fe}} = (1860 + j680) + (5,76 + j50,02) =$$
$$= (1865,76 + j730,02)\ \mathrm{kVA}.$$

$$\Delta\underline{S} = Z_{ek} \cdot \frac{|\underline{S}_{ek}|^2}{U_{\mathrm{n}}^2} = (1,781 + j2,462) \cdot \frac{1865,76^2 + 730,02^2}{10^2} =$$
$$= (71,5 + j98,8)\ \mathrm{kVA}.$$

$$\underline{S}_{\mathrm{A}} = \underline{S}_{ek} + \Delta\underline{S} = (1937,26 + j828,82) = 2107,1 \cdot e^{j23,2^\circ}\ \mathrm{kVA}.$$

$$I_{\mathrm{A}} = \frac{S_{\mathrm{A}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{A}}} = \frac{2107,1}{1,732 \cdot 10,3} = 118,1\ \mathrm{A}.$$