

3. ОСТАНАТИ АСПЕКТИ НА КВАЛИТЕТОТ НА ЕЛ. ЕНЕРГИЈА – НЕСИМЕТРИЈА И ВИШИ ХАРМОНИЦИ

3.1. Општо

Во овој материјал, којшто се занимава со главните проблеми на делот од електроенергетиката наречен „квалитет на електричната енергија“ (**Power Quality – PQ**) подетално ќе стане збор за проблемите какви што се несиметријата и несинусоидалноста на напоните во електроенергетските мрежи. Освен тоа, ќе стане збор и за контролата на квалитетот на електричната енергија како и за другите аспекти коишто се занимаваат со техничко-економските можности за нејзиното подобрување. Посебен акцент ќе биде ставен врз несиметријата и несинусоидалноста на напонот, кои покрај колебањата на напонот, претставуваат главни критериуми за квалитетот на електричната енергија. Варијацијата на фреквенцијата во системот претставува, исто така, една компонента преку која се мери квалитетот но проблемите со фреквенцијата на напонот се решаваат на друго, повисоко ниво, кај самите извори, Затоа за неа овде нема многу да се говори.

Во последно време забележливо се зголеми бројот на електричните приемници со големи моќности кои го влошуваат квалитетот на електричната енергија. Поради тоа се наложува на соодветните стручњаци кои работат на проектирањето и експлоатацијата на електричните мрежи, неминовно да бидат запознаени со современите методи и средства за подобрување на квалитетот на електричната енергија.

Во материјалов накусно ќе бидат наведени основните поставки од регулирањето на фреквенцијата, анализа на системот на напоните во дистрибутивните мрежи, како и определувањето на режимот на работа врз средствата што го регулираат истото. Натаму, се ќе разгледуваат и прашања од анализата и контролата на варијацијата на напоните, на несиметријата на напоните и струите и на аспектите на несинусоидалноста, т.е. хармониците.

Еден од основните показатели, по кој се оценува квалитетот на електроснабдувањето е квалитетот на електричната енергија. Тој се определува не само со техничката толеранција на параметрите со кои електричната енергија се пренесува до приемниците, туку и со економскиот ефект – исплатливоста од користењето на таа енергија. Од своја страна техничките услови на работа, утврдувајќи ги границите на промена на квалитативните показатели на електричната енергија, се определуваат и од непосакуваните економски последици кои можат да настанат со пореметувањето на тие граници. Затоа, гледано од тој аспект, квалитетот на електричната енергија во полна смисла на зборот, претставува економска категорија. Поради тоа и обврската за

обезбедување на квалитет на електричната енергија има определен економски ефект за стопанството. Меѓутоа поради немање на соодветно изграден информативен систем, не е можно тој ефект да биде и квантитативно изразен. Во таа смисла познати се само резултатите од истражувањата во некои земји како што се САД, Германија, Русија и други. Тие истражувања се вршени со цел да се утврдат штетите и загубите што се остваруваат во разни претпријатија од областа на металургијата, машиноградбата, хемиската и другите видови индустрии, поради отстапувањето на показателите за квалитет на електричната енергија од нивната номинална вредност. Во многу случаи тие отстапувања се во границите на дозволеното, обично до $\pm 5\%$.

Според утврдените стандарди во повеќето земји квалитетот на електричната енергија се определува врз основа на следните показатели:

- отстапување на фреквенцијата, варирање на фреквенцијата,
- промена на напонот, варирање на напонот,
- несиметрија на напонот,
- несинусоидалност на напонот.

Отстапувањето (промената) на фреквенцијата претставува разликата помеѓу нејзината вистинска и нејзината номиналната вредност.

$$\Delta f = f - f_n \quad (3.1)$$

каде што f е вистинската, т.е. реалната вредност на фреквенцијата (Hz) а f_n е номиналната вредност на фреквенцијата (Hz).

Во нормален режим на работа во еден електроенергетски систем отстапувањето на фреквенцијата не треба да надминува повеќе од $\pm 0,1$ Hz. Притоа се нормира и т.н. синхронизационо време:

$$t_s = \frac{1}{f_n} \int_0^t f \cdot dt \quad (3.2)$$

кое не треба да се разликува од реалното, астрономско, време за повеќе од 2 min.

Поради континуираните варијации на оптоварувањето, фреквенцијата, односно нејзините отстапувања (отклонувања) се менуваат исто така континуирано со текот на времето. Од тие причини отклонувањата на фреквенцијата се определуваат не со моменталната разлика, туку со средна разлика во временски интервал од 10 минути.

Варијацијата на фреквенцијата е разлика помеѓу најголемата и најмалата вредност на основната фреквенција при брзи промени во режимот на работа на електроенергетскиот систем при што брзината на промената на основната фреквенција

не е помала од 0,2 Hz/s. Според утврдени стандарди варијацијата на фреквенцијата во нормален режим на работа во електроенергетскиот систем (ЕЕС) не смее да ги надминува нормираните отстапувања на фреквенцијата за повеќе од 0,2 Hz.

Промената (отстапувањето) на напонот е еден од најважните показатели за квалитетот на електричната енергија. Тој се определува со разликата ΔU помеѓу реалната вредност на напонот U и неговата номинална вредност U_n :

$$\Delta U = U - U_n \quad (3.3)$$

Обично процентуалното отстапување на напонот се изразува во проценти, во однос на неговата номинална вредност. Според тоа, ќе имаме:

$$\Delta U\% = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100. \quad (3.4)$$

Отстапувањата (промените) се спори и континуирани промени на напонот, условени од промените на оптоварувањата со текот на времето.

Во разни земји постојат различни стандарди со кои се нормираат дозволените отстапувања на напонот од номиналниот. Тие меѓусебно се разликуваат во извесна мера. Вообичаени се следните со стандард дозволени вредности на отстапувањата на напонот од номиналниот напон:

- a) на клемите на електромоторите и апаратите за нивно пуштање и запирање – во границите од -5 до $+10\%$.
- b) на клемите на сите останати потрошувачи на електричната енергија во границите $\pm 5\%$.
- c) во постхавариски режими се дозволува дополнително снижување на напонот од 5% .

Варијациите (колебањата) на напонот претставуваат краткотрајни и брзи промени на ефективната вредност на напонот, кои настануваат со брзина поголема од 1% во секунда. Варијацијата на напонот се карактеризира со големината DU , која се дефинира како апсолутната вредност од разликата на еф. вредност на напонот помеѓу две соседни (во времето) карактеристични точки на кривата $U(t)$ која ги опишува:

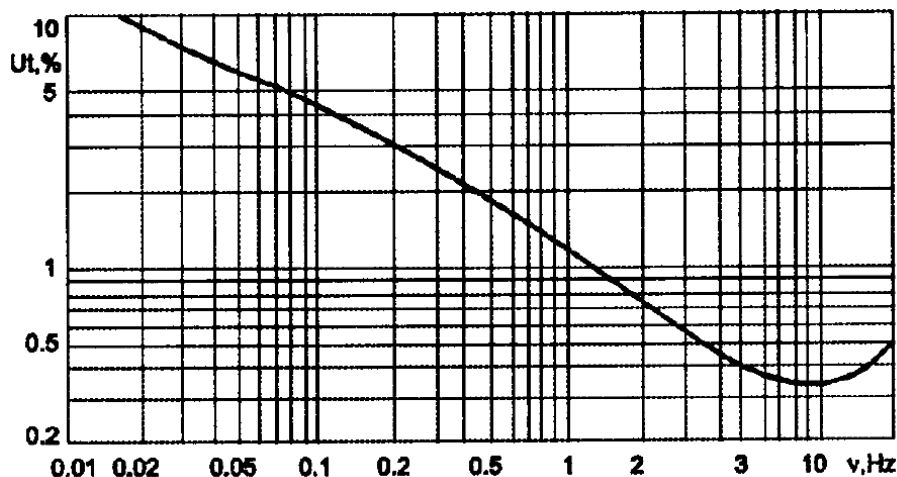
$$DU = |U_{\max}(t_k + \theta_k) - U_{\min}(t_k)| \quad (3.5)$$

каде што U_{\max} и U_{\min} се вредностите на напонот во соседните карактеристични екстремни точки; t_k е момент од времето којшто се совпаѓа со k -тиот екстрем; θ_k е временски интервал помеѓу карактеристичните екстремни точки.

Карактеристичните точки се такви точки од кривата на промена на напонот во кои првиот извод на напонот по времето е еднаков на нула. Тие се, значи, екстремни точки.

Големината на варијацијата на напонот обично се изразува во проценти во однос на номиналниот напон:

$$DU\% = \frac{|U_{\max}(t_k + \theta_k) - U_{\min}(t_k)|}{U_n} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.6)$$



Слика 3.1. Зависност на големината на варирањето на напонот од фреквенцијата на варирањето

Обично со стандарди се дозволуваат следните вредности за големината на колебањето на напонот:

- а) на светилките и телевизиските апарати таа не треба да ги надмине вредностите на кривата дадена на сликата 3.1.
- б) на клемите на радио апаратите, диспечерските и уредите за озвучување, контролно - мерните уреди, сметачките машини, електронските кола за управување, не треба да надминува 1,5% од U_n .
- в) кај потрошувачите со брзо променлив електричен товар не треба да надминува 1,5% U_n .
- г) за останатите потрошувачи, кои се напојуваат од заедничката дистрибутивна електрична мрежа, до 2,5% од U_n .

Несиметријата на напонот се карактеризира со вредностите на инверзната U_i и нултата U_0 компонента на напонот, изразени во проценти од номиналниот напон:

$$U_i\% = \frac{U_i}{U_n} \cdot 100; \quad U_0\% = \frac{U_0}{U_n} \cdot 100. \quad (3.7)$$

Несиметријата на напонот доведува до зголемување на сумарните отстапувања од номиналниот напон, како резултат на што се влошуваат условите за работа на потрошувачите. Инверзниот напон негативно се одразува врз работата на **вртливите електрични машини**. Кај нив инверзните струи добиваат значително поголема релативна вредност од релативните вредности на соодветните напони. Откако ќе се земат во предвид посочените околности во утврдениот стандард за сите симет-

рични трифазни потрошувачи се дозволува инверзна компонента на напонот (инверзен напон), не поголема од 2% од номиналниот.

Во трифазни електрични мрежи кои напојуваат еднофазни потрошувачи во домаќинствата како и осветлувачки приемници, инверзниот и нултиот напон **не се нормираат**, но се истакнува дека ефективната вредност на напонот на клемите на потрошувачите не треба да биде надвор од дозволените граници кога ќе се земат предвид сите влијателни фактори – нултиот и инверзниот напон, отстапувањата на директниот напон и присуството на вишите хармоници на напонот.

Несинусоидалноста на напонот се карактеризира со постоење на хармоник со основна фреквенција U_1 и на хармоници U_ν со повисоки фреквенции (ν - реден број на хармоникот).

Несинусоидалните режими ги содржат недостатоците на несиметричните режими, но поради поголемата фреквенција на вишите хармоници коишто се содржани во несинусоидалните струи, доведуваат до поголемо дополнително загревање на вртливите електрични машини и до зголемување на диелектричните загуби во кондензаторите. Присуството на вишите хармоници може да создаде и проблеми со резонантни појави.

Од аспект на работата на електричните потрошувачи несинусоидалноста на напонот не може да биде нормирана. Тоа е заради фактот што дејството на хармониците се појавува истовремено со дејството и на другите влијателни фактори. Затоа во утврдениот стандард во тој случај се прифаќа како дозволено такво искривување на синусоидата на напонот при кое отстапувањето на напонот не ги надминува дозволените вредности кога се земаат предвид и другите влијателни фактори. Како квантитативен показател за споредување на одделни вредности може да биде земена ефективната вредност на сите виши хармоници која според утврдениот стандард не треба да биде поголема од 5% од ефективната вредност на основниот хармоник на напонот со фреквенција 50 Hz. Ефективната вредност на напонот при постоење на виши хармоници може да се пресмета со помош на следната (приближна) формула.

$$U = U_1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot \sum_{\nu=3}^{13} U_\nu^2 \quad (3.8)$$

Ако ќе се земе предвид случајниот карактер на работата на електричните потрошувачи во текот на времето се забележува дека со стандардите обично се наложува, во **95%** од времето во кое се спроведува контролното мерење на квалитетот на електричната енергија, таа треба да им се испорачува на потрошувачите со вредности на показателите кои се во рамките на дозволените норми. Значи само во најмногу **5%** од времето на работа на електричните приемници се дозволува показателите за квалитет на електричната енергија да излезат надвор од со стандард утврдените граници.

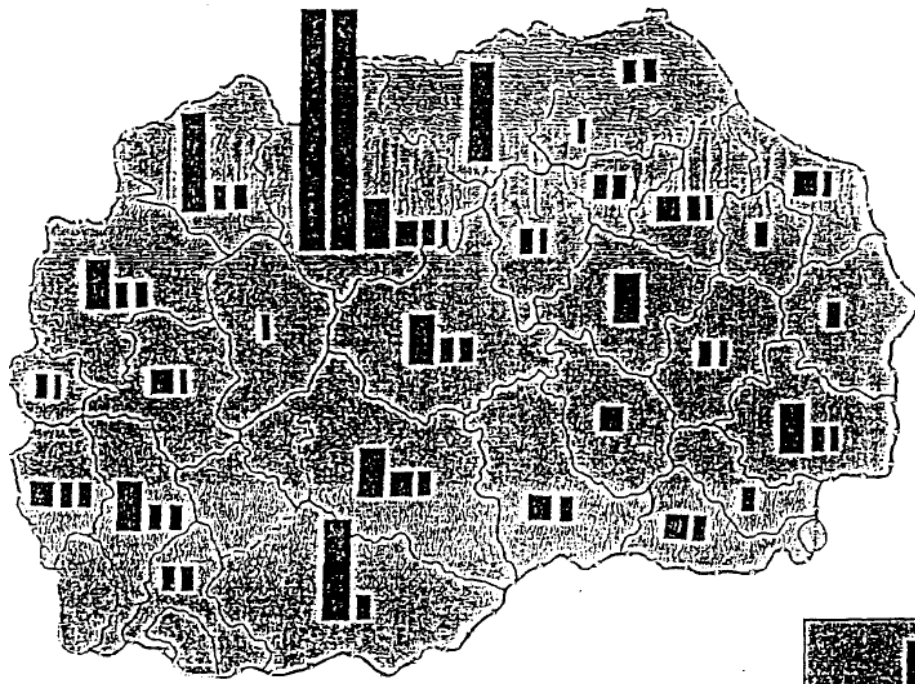
Во послените години во сите земји се обрнува се поголемо внимание на квалитетот на електричната енергија, особено на показателите на напонот. Тоа се должи на фактот што бројот на приемниците кои ја загадуваат електричната енергија и го влошуваат нејзиниот квалитет непрекинато расте.

Постои тенденција на зголемување на заемното влијание на различните видови електрични средства, уреди и апарати. За да се опише тоа влијание воведен и прифатен е терминот "електромагнетно взаемнодејство". Со него се определува степенот на заемното влијание на електричните средства при што не се набљудуваат пореметувањата во нивната нормална работа и намалувањето на нивната ефективност под некоја економски определена граница. Така, на пример, постоењето на вентилни енергетски преобразувачи во определен реон на електричната мрежа, поради нивниот нелинеарен карактер, предизвикува појава на виши хармоници кои негативно влијаат врз работата и врз животниот век на кондензаторските батерии во мрежата. Ако несинусоидалноста на напонот надмине една определена вредност тоа ќе доведе до нивно предвремено стареење и испад од работата. Но доколку нивото на деформација на синусната крива на напонот под дејство на вишите хармоници е под некоја прифатлива вредност, тогаш ќе биде можна заедничката работа на преобразувачите и кондензаторските батерии.

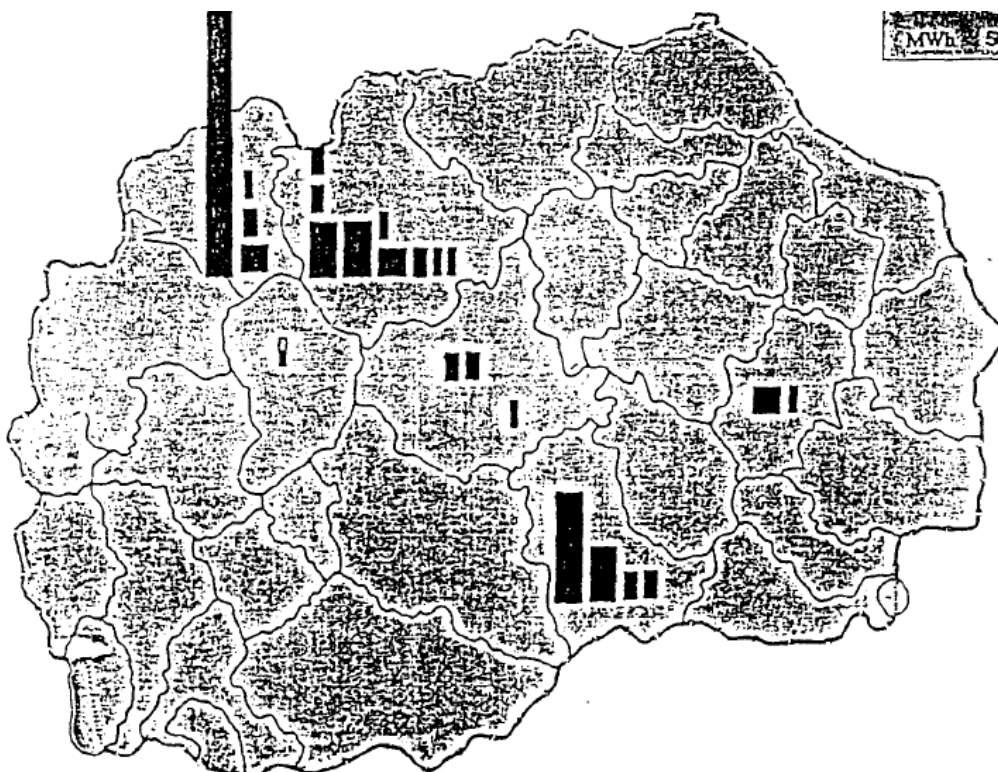
Во таа смисла нивната заедничка работа е детерминирана не само од параметрите на енергетскиот преобразувач туку и од карактеристиките на мрежата, од нејзината шема и моќноста на куса врска на напојните собирници. При тоа треба да се земе предвид и фактот дека различни приемници можат да се покажат како неподобни за електромагнетно содејство, дури и при вредности на несинусоидалноста и несиметријата помали од допуштените со утврдениот стандард.

Горе изложеното покажува дека работата на обезбедувањето квалитетна електрична енергија има многустран карактер што треба да се има предвид при проектирањето на електричните системи. Конвенционалните проверки на квалитетот на електричното напојување само по условот за дозволеното отстапување на напонот, во многу случаи не се доволни. Затоа при проектирањето на дистрибутивните мрежи треба да се располага со поцелосна информација за видот на потрошувачите на мрежата за да биде осигурано прифатливо електромагнетното содејство на потрошувачите што се напојуваат од заедничката мрежа.

Состојба со типот на потрошувачите во Р. Македонија



Слика 3.2. Потрошувачка на електрична енергија во дистрибуцијата



Слика 3.3. Потрошувачка на електрична енергија
кај директните потрошувачи

Во прилог на погореспомнатото накусо ќе ја претставиме состојбата во нашата држава од аспект на структурата на

потрошувачите и како тие се однесуваат кон мрежата, т.е. какво влијание имаат кон неа. Податоците што тука се изложуваат не се најнови, т.е. се од постар датум.

Структурата на потрошувачите е многу битна за квалитетот на електричната енергија. На сликата 3.2 е дадена мапата на главните дистрибутивни потрошувачи додека на сликата 3.3 мапата на директните потрошувачи во Р. Македонија. Директни ги викаме оние големи индустриски претпријатија коишто се приклучени директно на преносниот систем, на 110 kV напонско ниво. Тие обично претставуваат моќни потрошувачи, како што се електролачните печки и сл. Големи директни потрошувачи се компаниите Макстил, Балканстил (некогашна Железара), Силмак (некогашен Југохром-Јегуновце), Охис, Бучим, Фени-индастри, Рафинеријата Окта и други.

1. Електротермиски постројки и потрошувачи

Постојат три вида вакви потрошувачи, со различна моќност. Тоа се:

- електрични печки (топење руда, метали, електрометалургија)
- апарати за заварување. Вакви има и со доста големи моќности, на пример 100 до 200 kVA. Тие се приклучуваат на дистрибутивната мрежа.
- Апарати за домаќинството. Апаратите за домаќинство се со помала моќност, но затоа тие се многу масовно застапени. Наменети се за загревање на простории, вода, храна и др.

За големината на овој вид потрошувачка нека послужи податокот дека, денес, околу 25 – 30% од потрошената електрична енергија директно се претвора во топлина преку овие електротермиски потрошувачи. Но порано, кога индустријата работеше со полна пареа, на индустријата во Р. Македонија отпаѓаа 65 – 70% од вкупната потрошувачка на електрична енергија, што не е вообичаено за развиените земји (со исклучок на пример на Норвешка и Шведска). Обично во развиените земји во индустријата се троши од 50 до 60% од вкупната потрошувачка на електрична енергија во земјата.

2. Печки во големи индустриски претпријатија

Макстил и Балканстил (Железара) Скопје има две печки од по 33 MVA. Овие се електроредукциони печки со затворен лак при што електродите се потопени во шаржата. Работата им е мирна и тие не се многу опасни од аспект на квалитетот на електричната енергија, т.е. не создаваат хармоници и не се извори на несиметрија. Тие се напојуваат преку 110/20/kV трансформатори. Денес не работат, но погонски се спремни, и доколку се обезбедат поволни економски услови, може да се активираат.

Освен овие, има и една печка со отворен лак (електро-лачна печка) наменета за топење на старо железо и производство на челик. Таа е со голема моќ (50 односно 60 MVA). Струјата на секундарна страна е огромна, $I = 60 - 100 \text{ kA}$ при напон $U = 100-500 \text{ V}$. Работата на печката во првата фаза на топење е многу немирна, создава широк спектар на хармоници и големи несиметрии. При крајот од процесот на топењето, кога металот сосема ќе се растопи, печката работи многу помирно. Оваа печка работи ретко, можеби само десетина дена месечно, кога се обезбеди суровина за топење.

Силмак (некогашен **Југохром-Јегуновце**) е фабрика за феролегури. И овде има печки од обата вида, со затворен, и со отворен лак. Моќноста им е различна. Најголеми се следните четири: 16 MVA; 21,3 MVA; 24 MVA и 48 MVA. Сите заедно повлекуваат 123 MVA. Има сличности во работењето со печките во Железара, но и разлики. Сепак, кај овој потрошувач, заради подобра структура на шаржата, работата е помирна.

Фени Индастри – Кавадарци. Има инсталирано две печки. Моќноста е 84 MVA, со затворен лак. Се напојува преку три еднофазни печни трансформатори.

3. Електрично заварување

Го има со најразлични моќности, од малите хоби апарати (4 – 5 kVA) по населбите, кои сепак можат да создаваат фликери, несиметрија и виши хармоници, локално во НН мрежа, па сè до апарати за континуирано заварување, со моќност и до 100 kVA. Големи уреди за заварување има, на пример, во фабриката за заварени цевки 11 Октомври од Куманово Силни постројки за електрично заварување има и во Факом-Скопје, Д. Бањарот – Прилеп, Николферт – Николиќ (за бетонско железо) и во други помали приватни погони. Статистиката покажува дека Р. Македонија е на високо место во светот според процентуалната вредност на инсталираната моќност на уредите за електрично заварување. Тие создаваат фликери и се извори на несиметрија и на виши хармоници. Работат во интермитиран или импулсен режим (нпр. точкасто заварување). Создаваат пречки во дистрибутивната мрежа. Во споменатите големи фабрики има и други електротермички уреди – печки за оджарување и откалување со голема моќност.

Во **Алумина**, која наскоро ќе се рестартира, има помали, но специфични, индукциони печки кои работат со фреквенција 50 Hz. Ниската фреквенција е потребна за длабоко проникнување на виорните (вртложните) струи во металот. Обично се поврзуваат на две фази, но со помош на специјална врска која содржи и кондензаторски батерии, тие се „симетрираат“ т.е. се однесуваат како трифазен симетричен потрошувач. Во овие погони постојат две печки со моќности од 0,5 MW и 1,5 MW. Во Алумина има и други печки, но тие работат на електроотпорен принцип, Нивната

моќност е по 120 kVA и служат за оджарување на шаржата при легирањето.

Домаќинствата се исто така голем потрошувач на електрична енергија. Кај нив ел. енергија се претвора директно во топлинска. Грубо може да се оцени дека има термоакумулациони печки преку 100.000 домаќинства. Зимно време околу 50.000 од нив се истовремено во погон. Во поново време во домаќинствата се појавуваат котли за парно греење на електричен погон, со моќности од околу 18 kVA. Во домаќинствата се присутни и бојлери за греење на вода. Притоа се проценува дека сите тие, заедно, повлекуваат од ЕЕ систем помеѓу 100 и 150 MW. Овие потрошувачи не создаваат фликери и несиметрии, но создаваат други проблеми, како што се преоптоварувања во мрежата, испади и хаварии поради преоптоварувањето, намален напон, зголемени загуби и др.

4. Постројки за електрична влеча

Ваквите постројки, во принцип, можат да бидат извор на проблеми. И кај нас постојат вакви потрошувачи, но тие не се многу застапени. Особено сега, кога стопанската активност е замрзната, транспортот со железница стагнира.

Во Р. Македонија имаме околу 200 km електрифицирани железници на трансферзалата север-југ. Постојат три напојни станици, кај Миладиновци, Згрополци и кај Гевгелија.

Постојат два вида локомотиви: со 4 и со 6 оски. Напојувањето со електрична енергија се врши на 25 kV ниво, 50 Hz, монофазно. Притоа насочувачите се во самата локомотива. Во македонски железници сообраќаат шест локомотиви од по 4 MVA и 3 локомотиви од по 6 MVA. За среќа, тие не работат истовремено. Тие развиваат полна моќност само при успон. Во светот масовно се користи рекуперативно кочење, а кај нас постои само механичко. При одржувањето на патната брзина-кочењето се спроведува со примена на отпорник.

Кај нас засега во градовите нема електрична влеча (трамвај) или тролејбус.

5. Електромоторни погони

Од аспект на квалитетот на електричната енергија проблематични се регулираните електромоторни погони преку насочувачи, регулираните тиристорски мостови, инвертори и др. Вакви, со голема моќност има во Железара–Скопје, но засега тие не се во погон. Во некои фабрики има електролиза-галванизација (Кончар, Еуроинвест). Помодерни, фреквентни претворувачи за погон на наизменични асинхрони мотори има релативно малку по број со релативно помала моќност (околу 1% од сите погони) и тие се на 0,4 kV. На пример, во Охрид има 4 по 250 kVA, 2 од по 100 kVA, 2 од по 25 kVA. Регулирани електромоторни погони има и во фабриката за кабли во Неготино.

6. Електрично Осветление

Ова е значаен потрошувач. Се проценува дека од 5 до 10% од вкупната потрошена електрична енергија се троши за оваа намена. Во светот овој процент се движи 2 до 20% зависно од развиеноста на земјата. Всушност осветлувањето, историски посматрано, е првата примена на електричната енергија. Интензитетот на осветленоста зависи од дејноста.

7. Домаќинства.

Домаќинствата најмногу користат сијалици со вжарено влакно бидејќи тие даваат осветление со најмалы инвестиции. Не е рационално, но овој вид не создава проблеми од аспект на квалитетот. Но некавалитетот на електричната енергија може да им штети. Така, на пример, преголемиот напон предизвикува скусување на нивниот животен век. Во последно време сме сведоци на продор на флуоресцентното светло и по домовите. Последици на тоа се: лош фактор на моќност, пречки, виши хармоници, брум на придушниците, создавање на магнетни полиња, а при палењето остри импулсни пречки. Во последно време продираат и компактни флуоресцентни лампи со електронска пригушница. Тие навистина овозможуваат заштеда на електрична енергија, но се затоа поскапи како инвестиција. Создаваат виши хармоници. Од овој аспект тие се денес многу подобри.

Осветление во Индустријата. Во индустријата се применуваат разни видови. Во халите на металната индустрија преовладува живиното осветлување со висок притисок. Во лесната индустрија и секаде каде што се бара распознавање на боите обично се користи флуоресцентно осветление (конфекција, фармацевтска индустрија, прехранбена индустрија и сл.). Тие не зрачат топлина, што е погодно за реализирање на климатизација во објектите. Халогеното осветление се користи кога се сака да се постигне повисок квалитет во осветлувањето, амбиент на свеченост, привлечност и естетика. Обично се примеува во банки, продавници, излози, хотели и други јавни установи.

Во **стадиони** и други **спортски објекти** најмодерни се и најзастапени се метал-халогените (халогениди на некои метали и ретки земји, metalhalid). Тие овозможуваат добро распознавање на боите и имаат голема енергетска ефикасност. Тие исто така спаѓаат во т.н. нелинеарни потрошувачи и како такви се извори на виши хармоници. На пример, еден стадион може да има моќност инсталирана во осветлениот и над 1 MW и да биде голем извор на виши хармоници.

Улицы. Обично тука се применува живино светло. И овие светилки спаѓаат во нелинеарните потрошувачи. Нов тренд во осветлувањето на улиците е примена на светлики со натриум (Na) под притисок. Тие имаат висока енергетска ефикасност и штедат електрична енергија. Во последно време се појавија и светлики со натриум под низок притисок кои се, во енергетска смисла, уште поефикасни од претходните натриумови светилки.

Установи: Кај установите доминира флуоресцентното осветление. Но треба да се обрне внимание дека во установите денес има сè поголем број на нови видови нелинеарни потрошувачи какви што се компјутерите, копир-апаратите, факс-апарати, телефонските центри, современите лифтови и сл. Заради својот напоен дел, којшто е нелинеарен, тие создаваат виши хармоници и на тој начин дејствуваат врз квалитетот на електричната енергија во напојната мрежа.

Клима-уреди. Треба да се обрне внимание на фактот дека модерен тренд кај нас е вградувањето на сè поголем број клима-уреди. Тие обично се со помала моќност (иако по установите како на пример во банките, хотелите и др. има клима-уреди и со поголеми моќности), но се затоа многу масовни. Некои од нив се комбинирани, со можност и да служат за греење на просториите. Тие во принцип не се линеарни потрошувачи, но се специфични и заради големата инсталирана моќност и како такви може да влијаат врз влошувањето на квалитетот на електричната енергија. Бидејќи овој тренд не е под контрола и немаме многу сознанија за него, не е чудно ако во најскоро време се соочиме со непредвидени проблеми, на пример со лоши напонски прилики и преоптоварувања на дистрибутивниот систем и во лето, а не само во зима, како што сме навикнале. Оваа опасност е сосема реална бидејќи вообичаена практика кај нас е еднаш добиената енергетска согласност понатаму да не се контролира од страна на дистрибутерот на електрична енергија, а тенденција е во јавната дистрибутивна мрежа да се приклучуваат нови и сè помокни потрошувачи.

Домаќинства. Заслужува да се нагласи дека денес и во домаќинствата е присутен огромен број нелинеарни потрошувачи кои многу бргу се множат. Тие немаат голема инсталирана моќност, но се нелинеарни заради типот на својот напоен дел. Такви се, на пример, персоналните компјутери (PC), видео уредите, автоматските телефони, полначите на батерии, микробрановите печки, видео игри, миксери, фенови со регулација, право-смукалки со регулација, машини за перење со регулација и други.

Посебен иден потенцијален проблем е примената на моќните полначи на батерии. Засега кај нас немаме моќни полначи на батерии по домовите, но во развиените земји веќе постои извесен мал процент на електрични автомобили чии акумулатори треба ноќе да се полнат од напојната мрежа. Овој тренд наскоро ќе се појави и кај нас.

4. НЕСИМЕТРИЈА НА НАПОНОТ

4.1. Воведни забелешки

Во практиката е усвоено несиметријата на напонот да се опишува или определува со вредностите на струите и напоните од инверзниот и нултиот редослед. Појавувањето на тие компоненти е предизвикано од постоењето на несиметрични товари, неполнофазни режими на работата на одделни елементи од електричната мрежа како и заради несमितречноста на некои елементи на мрежата и разликата во нивните параметри по одделните фази. Во општ случај овие појави можат да бидат истовремени.

Кога нивото на несиметрија на клемите на приемниците на електрична енергија или на оние елементи од мрежата коишто ја генерираат таа несиметрија е поголемо од некоја однапред договорена и усвоена за максимална, вредност, тогаш станува збор за недозволена несиметрија. Таа не само што негативно се одразува во самата мрежа, туку ги влошува и некои од другите показатели за квалитетот на електричната енергија.

4.1.1. Причини за појава на несиметрија

Карактеристични случаи за појава на несиметрични режими во електричните мрежи се: постоење на несиметрични товари, неполнофазни режими на работа, различни параметри на фазите на одделни елементи од електричните мрежи.

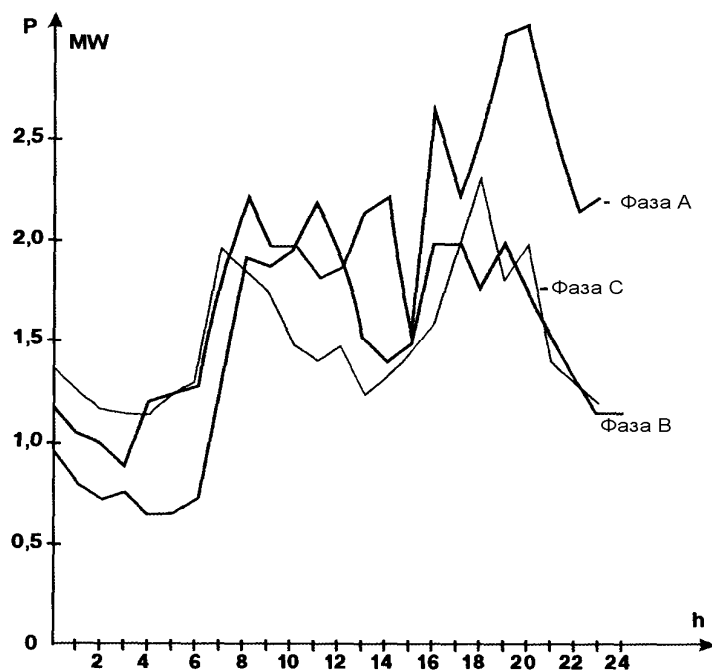
Во принцип несиметрични товари се среќаваат скоро во сите мрежи. Така на пример во дистрибутивните мрежи за низок напон (НН) кои напојуваат населени места, карактеристични несиметрични товари се електричното осветление, во индустријата, апаратите за заварување со различна моќност и др. Во мрежи за висок напон (ВН) тоа се електролачните печки кои се со големи моќности, електричните локомотиви за наизменична струја итн.

На НН мрежи коишто напојуваат населени места, е приклучен голем број монофазни приемници. Во нив влегуваат: електричното осветление, електричните печки, греалки, шпорети, бојлери, и др. Тука спаѓаат и еднофазните мотори со мала моќност (правосмукалки, машини за перење, фрижидери) итн.

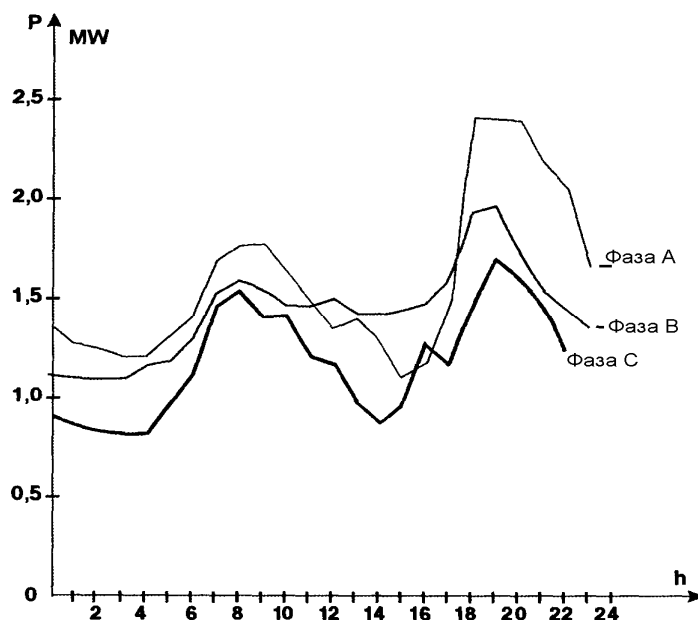
Очигледно е дека сите споменати потрошувачи на електричната енергија во секое домаќинство не работат истовремено и сосема ретко, практично никогаш, не се постигнува коефициент на едновременост на товарот еднаков на 1, кога максималната моќност на потрошувачите е еднаква на нивната вкупна инсталирана моќност.

На сликата 4.1 се прикажани дневните дијаграми на оптоварување на поедините фази од една трафостаница која

напојува населено место т.е. потрошувачи од категоријата домаќинства. На сликата 4.2, пак, е прикажан среден (упросечен) дневен дијаграм на оптоварувањето по фази на истата трафостаница, добиен за период од десет дена.



Сл. 4.1. Дневен дијаграм на оптоварување по фази на трансформаторската станица која напојува стамбени објекти



Сл. 4.2. Дневен дијаграм на оптоварување по фази на трансформаторската станица која напојува стамбени објекти, усреднет за период од десет деноноќија

Анализирајќи ги тие графици се гледа дека оптоварувањата на одделните фази значително се разликуваат, иако се водело сметка за т.н. „балансирање на товарот“ кога кон секоја фаза треба да бидат приклучени подеднаков број корисници со приближно еднаков состав и еднаква моќност на електричните приемници.

Разликата во оптоварувањето на одделните фази на мрежата се должи на случајни и неслучајни фактори, поради што и несиметријата е **случајна** и **неслучајна**. Неслучајната несиметрија се појавува како резултат на тоа што дури и кога од секоја фаза се напојуваат еднаков број на корисници, инсталираната моќност на електричното осветление и другите уреди во домаќинствата не е еднаква за секоја фаза поради тоа што постојат разлики во бројноста, животниот простор и стандардот (потрошувачката) на секое семејство. Таа се сведува кон т.н. **остаточна несиметрија** и треба да има релативно мала вредност. Затоа со текот на времето на работа е неопходно да се спроведува систематска контрола на оптоварувањата во одделните фази и да се вршат соодветни превклучувања заради израмнување (балансирање) на оптоварувањата по фазите. Тоа, пак, налага уште при проектирањето на мрежите да се предвидат можности за лесно и безопасно изведување на превклучувањата.

Случајната несиметрија е фактор кој постојано дејствува во нормалните режими на работа на градските и селските мрежи за низок напон. Нејзината појава е сврзана со веројатноста секој приемник да биде вклучен во мрежата во определен временски интервал, во зависност од низа случајни причини и фактори, како што е, на пример, бројноста и организацијата на животот во набљудуваното семејство и сл. Веројатноста за вклучување на електричните приемници се определува како однос на времето, во кое електричниот приемник е вклучен во мрежата, спрема вкупната должина на разгледуваниот временски период. Таа веројатност може да биде добиена врз основа на експериментални истражувања и врз основа на статистичка обработка на добиените резултати за разни типови потрошувачи.

Условите на работа на мрежите со низок напон се карактеризираат со постоење на голем број на монофазни потрошувачи. Пред 40-тина години оптоварувањето се состоело претежно од осветление и некои други поедини куќни потрошувачи со мала моќност. Затоа тогаш проблемите сврзани со несиметричните режими во тие мрежи не биле толку заострени. Сега во домовите се користат приемници со моќност од неколку киловати. Такви се електричните термоакумулациони печки, бојлерите и др. При непостоење на систематска контрола, несиметријата на напонот може да достигне значителни недозволености.

Во последниве неколку декади, поради примената на нови техники и нови технологии во индустријата поголема, актуелно стана и прашањето за **несиметричните режими во индустриските**

мрежи па дури и во СН дистрибутивни мрежи. Настанатите промени во структурата на електроснабдувањето во индустријата се условени од повисоките барања за економичност и ефективност на производствените процеси, квалитетот на производството и условите за работа. Тоа е сврзано и со значително зголемување на потребите за електрична енергија во индустриските погони и комплекси.

Во денешно време **термичките процеси** се скоро целосно електрифицирани. Електричните печки имаат повисока производност и висока економичност на работата во однос на предходните печки коишто биле загревани со тврди или течни горива. Тоа овозможува и постигнување на повисок квалитет и пониска цена на финалниот производ. Дава можност и за автоматизирање и механизирање на технолошките процеси но и подобрување на контролата на самите производни процеси. Порастот на единичната моќност на електротермиските инсталации води кон повишување на нивните техничко-економски показатели. Моќностите на електричните печки за топење на железо, хром и феролегури во денешно време достигнуаат вредности и над **60 MW** со тенденција тие да растат уште повеќе.

Голем дел од електротермиските инсталации се со трифазна изведба. Но и покрај тоа, (на пример во трифазните електролачни печки) оптоварувањето на одделните фази во некои стадиуми од технолошкиот процес е во суштина различно и неговата промена има случаен карактер. Низа електротермиски инсталации, зависно од технолошките или конструктивните особености, не можат да бидат изведени трифазни или, пак, нивниот коефициент на полезно дејство при трифазната изведба е понизок. Заради тие и слични такви причини еднофазните електротермиски инсталации добиле широка примена. Во редот на еднофазните потрошувачи спаѓаат и печките за топење и загревање, печките за графитизација и др.

Во производството се поголема застапеност има и електричното заварување. Инсталациите за електричното заварување се еднофазни. Нивната единечна моќност достигнува до **1500 kW** па дури и повеќе.

Електричниот железнички транспорт за наизменична струја е исто така извор на несиметрија. При напојувањето на електрични локомотиви напонот се доведува помеѓу контактниот вод (којшто е изолиран) и шините, додека една од фазите на трифазната мрежа се заземјува. Тоа представува двофазен товар за електровлечните потстанции. Независно од специјалните мерки што се преземаат, добиената несиметрија на параметрите на режимот се пренесува во напојните мрежи со повисок напон 110, 220 и 400 kV.

Најголема несиметрија на параметрите во режимите на работа се добива при **неполнофазна работа** на одделни елементи од мрежата: надземни водови, трансформатори, и др. Во дистри-

бутивните мрежи неполнофазните режими можат да бидат условени од постоењето на **еднофазни отцепи**. Во СН и ВН напојните мрежи, пак, неполнофазните режими се јавуваат во постхавариските состојби, т.е. во состојбите коишто се воспоставуваат после некој дефект во мрежата. Затоа кај нив тие ретко се случуваат и траат ограничено време.

Работата на електричните мрежи во неполнофазен режим во низа случаи се одразува негативно врз работењето на електричните приемници. Понекогш таквите режими можат да бидат опасни и за самите електрични уреди и приемници.

Надземните водови можат да бидат опремени со системи за фазно управување кои ја исклучуваат повредената фаза, ако дејството на **АПВ** се покаже неуспешно при настанување на **трајна (стабилна) грешка**. Бидејќи во повеќето случаи трајните грешки (повреди) се еднофазни, таквото исклучување доведува до работа на две фази. Притоа во мрежи со заземјена неутрална точка работата и електроснабдувањето во неполнофазен режим е обично дозволено бидејќи на тој начин се овозможува заштеда во инвестиции затоа што со тоа се избегнува потребата од градба на втор, резервен, вод, кој би бил неопходен во спротивниот случај.

Аналогна состојба е можна и со група, составена од еднофазни трансформатори (кои кај нас ги нема). Дефектот на една од фазите на примарната страна од трансформаторот не доведува до прекин на снабдувањето, ако **работата на две фази** е дозволена. При тоа во соодветната трафостаница не е неопходно постоење на резервна фаза.

Но сепак практиката покажала дека надземните водови се најнедоверливи во погонот и дека тие се основен извор на прекините, повредите и работата во неполнофазен режим.

Кај нас е вообичаена практика надземните водови со должина под **80 km** да не се транспонираат. Затоа најголемиот процент од водовите се **нетранспонирани** и како такви, тие се извор на несиметрија во мрежата, иако се утврдило дека таа несиметрија е мала. Но постојат и многу други причини за создавање на несиметријата така што се смета дека оваа несиметрија, која е последица на одсуство на транспозицијата, може да се толерира.

4.1.2. Влијание на несиметријата врз работата на електричниот систем

Постоењето на несиметрија во електричниот систем е поврзано со појавување на компоненти на инверзниот и нултиот редослед на струјата (I_i и I_0) и на напонот (U_i и U_0). Векторското сумирање на компонентите на струите со инверзен и нулти редослед доведува до зголемување на сумарните струи во одделните фази во мрежата. Како последица од тоа, заради условите на загревање, се намалува нивната дозволена струја со директен редослед, т.е. им се намалува пропусната способност.

Векторското сумирање на напоните со инверзен и нулти редослед доведува до дополнителни отклонувања на напонот во одделните фази. Како резултат на тоа на клемите на потрошувачите се доведува напон со зголемено отклонување, а тоа може да добие вредности надвор од дозволените граници.

Дури и појавувањето на мали вредности на инверзни напони на клемите на **вртливите електрични машини** (генератори, синхрони и асинхрони мотори) доведува до создавање на значителни инверзни струи во намотката на статорот. Тие струи создаваат магнетно поле со насока на вртење, обратна од насоката на вртење на роторот. Во однос на тоа поле роторот се врти со двојно поголема брзина и во неговите масивни делови се создаваат е.м.с и струи со двојна фреквенција, кои предизвикуваат дополнително загревање на машината.

Појавата на инверзни и нулти напони во попречните гранки на мрежата и на инверзни и нулти струи во нивните подолжни гранки како и во електричните приемници предизвикува дополнителни загуби на активна моќност и енергија. Тоа ја намалува економичноста во работата на електричниот систем.

Нултите струи течат низ **заземјувачите на постројките** и ја влошуваат нивната работа. Тие можат да бидат извор на **опасности** заради појава на **опасни напони** на допир и чекор во околината на заземјените објекти. Во исто време долготрајното течење на струја низ еден заземјувач може да предизвикаа и **сушење на почвата** во околината на самиот заземјувач. Тие вршат **влијание и врз нискофреквентните канали** на телекомуникационите врски, на сигнализационите и автоматските системи и др.

4.2. Определување на параметрите на несиметричните режими

4.2.1. Општо

Параметрите на несиметричните режими можат да бидат претставени преку системот на **фазни координати**, каде што напоните и струите во секоја точка од мрежата се определуваат со соодветните фазни вредности на напоните и струите (\underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c) и (\underline{I}_a , \underline{I}_b , \underline{I}_c). Исто така, несиметричниот режим во една мрежа може да биде опишан и во **симетрични координати** преку системот на симетрични компоненти (\underline{U}_d , \underline{U}_i , \underline{U}_0) и (\underline{I}_d , \underline{I}_i , \underline{I}_0). Индексите d , i и 0 ги представуваат соодветно директниот, инверзниот и нултиот систем.

Соодносот меѓу тие параметри на режимот се определува со матрицата на трансформација \underline{F} на системот на симетрични координати:

$$\underline{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

или со инверзната матрица

$$\underline{\mathbf{F}}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

каде што комплексниот оператор \underline{a} е:

$$\underline{a} = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \underline{a}^2 = e^{-j2\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Трансформацијата на големините од симетрични координати во фазни извршува со помош на следниот матричен израз:

$$\underline{\mathbf{U}}_f = \underline{\mathbf{F}} \cdot \underline{\mathbf{U}}_s, \quad (4.3)$$

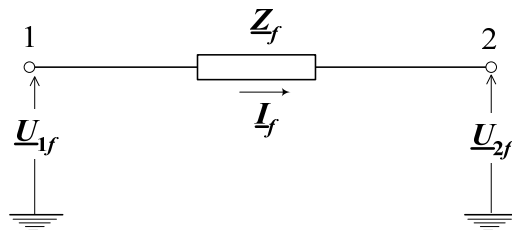
или

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Обратната трансформација, кога од познатите назни напони ги определуваме соодветните симетрични компоненти, се врши со помош на изразите (4.5) и (4.6):

$$\underline{\mathbf{U}}_s = \underline{\mathbf{F}}^{-1} \times \underline{\mathbf{U}}_f, \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$



Сл. 4.3. Трифазен елемент на мрежата прикажан преку матрицата $\underline{\mathbf{Z}}_f$ на редната грнка

Падовите на напонот во системот на фазните координати во трифазен елемент од мрежата (слика 4.3) со матрица на редните импеданции $\underline{\mathbf{Z}}_f$ се определуваат формулата запишана во скратен матричен вид:

$$\Delta \underline{U}_f = \underline{Z}_f \times \underline{I}_f \quad (4.7)$$

каде што е:

$$\Delta \underline{U}_f = \underline{U}_{1f} - \underline{U}_{2f} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{1a} \\ \underline{U}_{1b} \\ \underline{U}_{1c} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{U}_{2a} \\ \underline{U}_{2b} \\ \underline{U}_{2c} \end{bmatrix};$$

$$\underline{I}_f = \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix}; \quad \underline{Z}_f = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{aa} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ac} \\ \underline{Z}_{ba} & \underline{Z}_{bb} & \underline{Z}_{bc} \\ \underline{Z}_{ca} & \underline{Z}_{cb} & \underline{Z}_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Доколку сакаме да воспоставиме врска помеѓу симетричните компоненти на соодветните напони и струи кај трифазниот елемент, тогаш ќе постапиме на следниот начин:

Ако матричната релација (4.7) во системот на симетрични координати најнапред ја помножиме (од лево) со матрицата \underline{F}^{-1} , ќе добиеме:

$$\underline{F}^{-1} \times \underline{U}_f = \underline{F}^{-1} \times \underline{Z}_f \times \underline{I}_f \quad (4.9)$$

Со оглед на релацијата (4.5), од последната матрична релација (4.9) следи:

$$\underline{U}_s = \underline{F}^{-1} \times \underline{Z}_f \times \underline{F} \times \underline{I}_s,$$

или

$$\underline{U}_s = \underline{Z}_s \times \underline{I}_s, \quad (4.10)$$

каде што е:

$$\underline{Z}_s = \underline{F}^{-1} \times \underline{Z}_f \times \underline{F} \quad (4.11)$$

Последната релација ја определува матрицата на импеданции \underline{Z}_s во симетрични координати.

Тоа правило може да се примени и за другите параметри на еквивалентните шеми, пример за попречните адмитанции на елементите од мрежата важи истото, т.е.:

$$\underline{Z}_s = \underline{F}^{-1} \times \underline{Z}_f \times \underline{F} \quad (4.11)$$

за коефициентите на трансформација

$$\underline{Y}_s = \underline{F}^{-1} \times \underline{Y}_f \times \underline{F}, \quad (4.12)$$

и.т.н.

Анализата на несиметричните режими во симетричните мрежи позгодно е да се работи во системот на симетрични координати. Но кога во мрежата постојат поголем број несиметрични потрошувачи и поголем број несиметрични елементи или пак мрежата содржи четирипроводни елементи, што е карактеристично за НН дистрибутивни мрежи, тогаш е поповолно таквите режими да се решаваат директно, во фазен

домен. Затоа во натамошните анализи на несиметричните режими во една мрежа ние ќе го примениме вториот пристап и анализите ќе ги вршиме со помош на готова компјутерска програма која што работи во системот на фазни координати.

4.2.2. Параметри на елементите на мрежата при несиметрични режими

Параметрите на елементите на електричните мрежи се од суштинско значење за режимите што се воспоставуваат во нив. При нормален симетричен режим режимите тие се карактеризираат, т.е. опишуваат со директните импеданции. Но при анализата на несиметричните режими се земаат предвид инверзните и нултите импеданции. Кога помеѓу импеданциите на одделните фази не постои магнетна спрега, импеданциите не зависат од редоследот на фазите и тие се меѓусебно еднакви. Тогаш важи:

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = \underline{Z}_0. \quad (4.13)$$

Во последната релација соодветните импеданции на елементите од мрежата, за директен, инверзен и нулти редослед (систем). Кај елементите од мрежата кај кои нема вртливи (подвижни) делови, какви што се, на пример, водовите, каблите, реакторите, кондензаторските батерии, енергетските трансформатори и др., а притоа постојат заемни електромагнетски спреги, меѓусебната индуктивност помеѓу фазите на соодветниот елемент не зависи од нивниот редослед и во тој случај директната и инверзната импеданција на елементот се заемно еднакви, т.е. :

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i.$$

Но затоа кај нив нултите импеданции се разликуваат од директните и нивните вредности зависат од многу фактори. На пример нултата импеданција \underline{Z}_0 кај трансформаторите зависи од нивната конструкција, од шемата на врзување на намотките, од степенот на заситување на магнетското коло и др. Кај надземните водови врз вредноста на нултата импеданција големо влијание има конструктивната изведба на водовите, постоењето на заштитно јаже или нулти спроводник, големината на нивната импеданција и др. Кај кабелските водови нултата импеданција Z_0 зависи од бројот на жилите, материјалот од којшто е направена обвивката (плаштот), начинот на положување на каблите, присуството на други метални инсталации во нивата близина, импеданциите на заземјувачите и др. Начинот за пресметување на нултите импеданции на елементите од мрежата, многу подетално опишан, може да се најде во соодветна стручна литература.

Во таа смисла специјален случај представуваат четири-спроводните нисконапонски надземни водови како и четирижилните кабелски водови. Кај нив е најправилно нултата импеданција \underline{Z}_0 да се определува експериментално, со директни мерења на теренот.

Активниот отпор за нулти редослед кај нив приближно се определува по формулата:

$$R_0 = R_f + 3 \cdot R_n, \quad (4.14)$$

каде што R_f и R_n се активните отпорности на фазниот и на нултиот спроводник – соодветно, изразени во Ω . Врз основа на експериментални податоци за вредностите на нултите компоненти на индуктивните отпори кај кабли за низок напон (до 1000 V) со алуминиумски жили, со груба апроксимација, може да се прифати дека нултата компонента на индуктивната отпорност X_0 не треба да ја надмине трикратната вредност на дирекната компонента X_d .

Дистрибутивните трансформатори кои напојуваат четири-спроводни мрежи за низок напон, во принцип, можат да бидат изведени со различни шеми на соединување на намотките: Y/y_0 , Y/z_0 , или D/y_0 .

Трансформаторите со шема на соединување Y/y_0 имаат најголема нулта импеданција Z_0 . Кај нив односот Z_0/Z_d се движи во границите од 10 до 20. Тоа се објаснува со фактот дека нултите струи кои течат низ трите фази на трансформаторот, создаваат магнетно поле кое се затвора не само низ неговото магнетско коло туку и низ трансформаторскиот сад.

Значително подобри карактеристики имаат дистрибутивните трансформатори со шема на соединување Y/z_0 . Нивната нулта индуктивност е пропорционална само на растурните флуковски и затоа е помала од директната индуктивност. Исто така нултата активна отпорност е помала од директната активна отпорност. Недостаток на овие трансформатори е поголемото количество на употребен бакар за изработка на секундарната намотка, што предизвикува и поголема цена на чинење од онаа на трансформаторите Y/y_0 .

4.2.3. Анализа на несиметријата на напоните и струите

Анализата на несиметријата во напојната мрежа, предизвикана од неполнофазните режими на работа на одделни нејзини елементи, од присуството на мокни несиметрични товари, приклучени директно на собиниците за среден и висок напон, или пак предизвикана од несиметријата на самите елементи (поради разликите во параметрите на одделните фази), е тешко, а во некои случаи дури и невозможно, да се изведе без користење на специјален математички апарат и современа пресметковна техника. Постои голем број можни методи за пресметка на несиметричните режими и тие се изложени во соодветната научна и стручна литература. На база на нив се развиени и разработени алгоритми за пишување и изготвување на соодветни компјутерски програми. Постоенето на такви програми за електроенергетските системи со сложена конфигурација е неопходно. Тоа им овозможува на стручњаците, кои се занимаваат со

проблемите во областа на проектирањето, планирањето и управувањето на режимите на електричните мрежи, своите анализи, заклучоци и решенија да ги базираат на реални проценки на таквите режими. На тој начин тие можат да ја проценуваат прифатливоста на анализираните режими, да дадат релевантна оценка дали дали се дозволени или не определени неполнофазни режими, кои пак поради некои други технички и економски причини и услови се наметнуваат како неопходни или неизбежни. Покрај тоа, со таквите анализи можат да се предвидат последиците до кои би дошло со приклучувањето на моќни несиметрични товари во мрежата како и да се согледаат можните мерки и зафати што треба да се преземат за разрешувањето на идните проблеми, и др. Но таа област е надвор од доменот на овој материјал.

Ние ќе се служиме со една таква апликација, развиена на Електротехничкиот факултет во Скопје. Инаку во литературата се среќаваат приближни методи за оценка на несиметријата кои овозможуваат таа да биде анализирана со релативно едноствна и куса пресметка. Овие методи се применливи за мрежите со низок напон. Имено испитувањата на несиметријата кај тие мрежи покажале дека за нив приближно важи $U_i \approx U_0$, поради што се прифаќа за сосема доволно при анализата на режимите во нив да се определат вредностите само на нултиот компонента на напонот U_0 во карактеристични точки од мрежата. Тие вредности можат и да се измерат непосредно, во процесот на експлоатацијата на таквите мрежи. Дозволените вредности на нултата компонента на напонот U_0 кај потрошувачите, приклучени на разгледуваните мрежи, сè уште не се определени со стандард. Поради тоа при анализата на несиметријата се налага да се определат вредностите на загубите на напон во одделните фази и соодветните отстапувања погонскиот напон кај потрошувачите од неговата номинална вредност. Тие отстапувања се споредуваат со стандардно дозволените отстапувања. Затоа земајќи ги предвид погоре изложените состојби се покажува дека за практични потреби е згодно да се применуваат упростени методи за определување на загубите на напонот при несиметрични оптоварувања.

Во практичните пресметки при **процесот на проектирање** на електричните мрежи се смета дека оптоварувањето е **идеално рамномерно распределено** помеѓу одделните фази и се претпоставува дека при експлоатацијата на мрежата, во иднина, персоналот систематски ќе ги отстранува појавите на неслучајна несиметрија. Случајната несиметрија притоа воопшто не се третира. Набљудувањата на несиметријата во погонски активните мрежи покажале дека дури и во случаите кога приклучоците во станбените згради се во трифазна изведба и при највнимателно пратење и балансирање на товарите помеѓу фазите, не е можно струјата во нултиот проводник да се намали под 20% од средната струја на оптоварување на одделните фази. Затоа **досегашната**

практика да не се прави оценка на несиметријата во фазата на проектирањето на една мрежа е погрешна и таа треба да се напушти. Но за да биде таквата оценка возможна, ќе биде потребно да се располага со податоци за очекуваната несиметрија на товарот, т.е. онаа несиметрија која дури и при највнимателно балансирање на товарот по одделните фази, не може да биде отстранета. Такви податоци и мерења во доволен обем, барем засега, кај нас не постојат иако во текот на 2007 година во ЕСМ-ЕВН се вршени низа мерења на несиметријата по фази на извесен број елементарни потрошувачи од категоријата домаќинства. Во секој случај тие мерења покажаа дека степенот на несиметријата на товарот во НН мрежи кои кај нас главно снабдуваат конзум од категоријата домаќинства, е прилично висок и тоа е една од причините за зголемените загуби во НН мрежи кај нас. Затоа ќе биде потребно и во иднина, уште поактивно, да се организираат такви и слични мерења и истражувања на степенот на несиметрија во нашите мрежи.

4.3. Контрола на несиметријата на напонот

4.3.1. Вид на контролните мерења

Во согласност со методологијата за контрола на квалитетот на електричната енергија, која се применува, контролните мерења на несиметријата се делат на: *приемни*, *периодични* и *епизодни*.

Приемните контролни мерења се спроведуваат:

- а) при воведување на нов елемент или при реконструкција на постојна електрична мрежа. Тие ги опфаќаат оние контролни точки за кои од мерењата на отстапувањето на напонот е установено дека тоа ги надвишува стандардно дозволените отстапувања;
- б) при воведување во погон на нови, моќни, потрошувачи со несиметричен товар.

Периодичните мерења се спроведуваат во следниве случаи:

- а) согласно со периодичните контролни мерења на отстапувањето на напонот и ги опфаќаат само оние точки во кои е утврдено дека отстапувањата на напонот ги надминуваат стандардно дозволените вредности;
- б) еднаш годишно на собирниците од трафостаниците од кои се напојуваат моќни потрошувачи со несиметричен товар како и на собирниците на генераторите кои се наоѓаат во близина на тие потстанции (заради нивна заштита од несиметрија);

Епизодните мерења се спроведуваат:

- а) при **нагла промена** на големината на електричните товари во мрежата;
- б) при настанување на **повреди и дефекти** на елементите во мрежата, предизвикани од несиметријата;
- в) при **официјално барање** од страна на некој од потрошувачите;
- д) по **наредба** на надредена организација.

4.3.2 Контролни точки

Контролни точки за мерење на несиметријата на напонот во електричните мрежи можат да бидат:

- а) **стегалките (клемите)** на трифазните електрични приемници;
- б) **главните разводни табли** како и НН разводни табли кај потрошувачите;
- в) **секундарните собинирци** во **трафостаниците**;
- г) **примарните собинирци** во трафостаниците;
- д) **секундарните собирници** во **разводни постројки** кои напојуваат моќни потрошувачи со несиметричен товар;
- ѓ) **примарните собиници** во разводните постројки кои напојуваат моќни потрошувачи со несиметричен товар;
- е) **собирниците на генераторски напон.**

Постојат **методи** со помош на кои **анализата на несиметријата** се врши преку познатите воспоставени веројатносни зависности помеѓу инверзните и нултите компоненти на напонот и познатата разлика помеѓу максималната и минималната вредност на фазните напони во одделни точки од мрежата. Но тие зависности не се валидни за случаите кога истовремено постојат директна и инверзна компонента на напонот. Исто така само од големината на модулот на соодветната симетрична компонента на напонот не е можно да се определи знакот на отстапувањето на напонот (дали е во плус или пак во минус), што е важно при анализа на квалитетот на напонот.

Затоа, за да се идентификува појавата на несиметрија при реализацијата на контролата на квалитетот на напонот, неопходно е **да се вршат мерења** на сите фазни и линиски напони. Конкретно, кај триспроводни мрежи, е потребно истовремено да се измерат трите меѓуфазни напони, додека за да се констатира постоење на нултата компонента на напонот во четири-спроводните мрежи, потребни се мерења на три фазни и два линиски напони. Податоците коишто се добиени на тој начин даваат можност да се определат отстапувањата на напонот на секоја фаза како и вредностите на симетричните компоненти U_i и U_0 т.е. фазните напони.

При организирањето на контролата на несиметријата неопходно е да се утврди нејзиниот статистички карактер. Тоа значи дека моментните вредности не можат да дадат доволно точна информација за големината, карактерот и причините на несиметријата за да се согледаат и неопходните мерки за нејзиното намалување. Користењето на конвенционални регистрациони апарати е неефикасно поради нивната мала точност и големата тешкотија при идентификацијата и обработката на покажувањата (регистрограмите). Затоа постои интерес за користење на статистички волтметри и други посоефицирани уреди за регистрација на напоните. Од соодносот на средните вредности на отстапувањата на напонот во поедините фази се прават проценки на појавата на систематска несиметрија. Таква несиметрија ќе има во мрежата кога ќе постои разлика во средните вредности на отстапувањата на фазните напони. Ако тие вредности се еднакви, тоа значи, дека нема систематска несиметрија. Појавата на дисперзија на напоните укажува на појавата на случајна несиметрија.

Најцелосна информација за режимот на напоните и струите во трифазните мрежи се добива од трифазен мерен уред, со непрекинато регистрирање на вредностите на напоните и струите и нивно запишување, за подоцна тие да можат да се обработуваат непосредно со помош на компјутери со програма која овозможува да се определат показателите за несиметријата што нас не интересираат. Апарати од тој тип се произведуваат од повеќе светски реномирани фирми и веќе се пуштени во масовна примена. Во почетната етапа на нивното представување, поради нивната висока цена, тие не можеа да се користат за масовни мерења.

Како што се гледа, за да се добие целосна и доволно точна информација за несиметријата во една мрежа неопходни се сложени мерења со користење на голем број мерни апарати. Контролата може да се реализира ако, на пример, се примени следниов пристап: со помош на едноставни уреди (филтри за нулта и инверзна компонента) се констатира постоењето на соодветните компоненти на напоните. На излезот од филтрите, кои се реализирани со висока прецизност, треба да има регистрациони уреди кои го забележуваат само времето кога несиметријата е најголема. Дури откако ќе се добијат податоци за местото и времето на појавување на најголемата несиметрија, е рационално да се применуваат посложени уреди, апарати и системи за добивање на целосна информација за несиметријата.

Но сè додека електродистрибутивните предпријатија не се снабдат и опремаат со соодветни уреди за контрола на несиметријата, пожелно е да се користат информациите за несиметријата коишто се собираат од страна на работниот персонал, периодично или епизодично, со помош на постојните показни уреди. При таквите мерења се регистрираат фазните напони на нисконапонската страна од дистрибутивните

трансформатори, струите во фазите од трансформаторот и како и струите на главните НН изводи. Врз основа на таквите информации е можно да бидат пресметани вредностите на нултата компонента на напонот U_0 со помош на следната формулата:

$$U_0 \approx \sqrt{\frac{(U_b - U_c)^2 + (U_c - U_a)^2 + (U_b - U_a) \cdot (U_c - U_a)}{3}} \quad (4.26)$$

Нултата компонента на струјата I_0 , пак, се пресметува со помош на формулата:

$$I_0 \approx I_{\max} \cdot \sqrt{(1 - k_{\text{med}}) \cdot (1 - k_{\text{min}}) + (k_{\text{med}} - k_{\text{min}})^2} \quad (4.27)$$

каде што е:

$$k_{\text{med}} = \frac{I_{\text{med}}}{I_{\max}}; \quad k_{\text{min}} = \frac{I_{\text{min}}}{I_{\max}}, \quad (4.28)$$

додека I_{\max} , I_{med} и I_{min} се струја во најоптоварената фаза, струја во средно-оптоварената фаза и струја на најслабо оптоварената фаза – респективно.

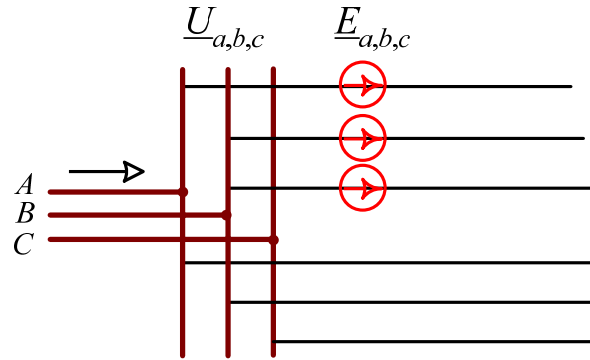
Формулите (4.26) и (4.27) даваат резултат со точност доволна за во пракса.

После тоа се определува односот U_0/I_0 кој треба да биде приближно еднаков на вредноста на нултата импеданција на дистрибутивниот трансформатор Z_0 . Ако тие две вредности значително се разликуваат, тоа ќе биде индикација за недоволна точност на мерењето или пак за голема вредност на импеданцијата на врската помеѓу нултиот спроводник од НН извод со неутралната точка од трансформаторот (прекин, лош контакт и др.).

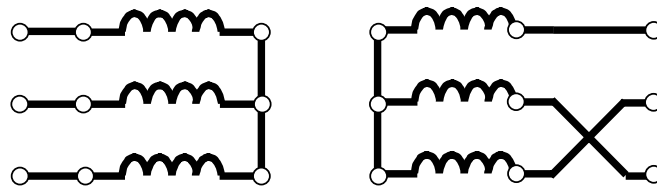
4.4. Симетрирање на несиметричните напонски режими

Под симетрирање на напонските режими се подразбира преземање на определени мерки за намалување на инверзната и нултата компонента на напонот.

Ако на собирниците на трафостаницата од која непосредно се напојуваат потрошувачи постои инверзна компонента на напонот (често нарекуван инверзен напон) U_i , таа може да се искомпензира со редно вметнување на трифазна емс \underline{E}_i со инверзен редослед. Таа трифазна емс се вклучува редно во водовите од кои се напојуваат потрошувачите на кои присуството на инверзната компонента на напонот U_i им ја нарушува нормалната работа (сл. 4.5). Тие можат да бидат добиени со помош на специјален трансформатор – изместувач на фази кај кого фазите на секундарните намотки се соодветно променети меѓу себе (сл.4.6.). Притоа се добива емс \underline{E}_i , која се совпаѓа по фаза со инверзната компонента на напонот \underline{U}_i .



Слика. 4.5. Принципиелна шема за компензација на инверзниот напон



Слика. 4.6. Принципиелна шема на трансформаторот за компензација на инверзниот напон

За да се измени вметнатата емс E_i по големина и по фаза неопходно е да се располага со два такви трансформатори. Едниот од нив треба да има емс \underline{E}_i која е фазно поместена во однос на компонентата \underline{U}_i за четвртина период.

Со помош на инверзна емс, обично се одстранува несиметријата на параметрите на режимот само во еден напојуван вод (извод). Во другите изводи е можно и да се зголеми несиметријата, бидејќи вклучувањето на емс во некоја гранка од колото и намалувањето на инверзната струја во неа до нула е соодветно на исклучувањето на таа гранка. Тогаш инверзната струја на целата шема се распределува меѓу преостанатите гранки, со што се објаснува зголемувањето на несиметријата во нив.

Ако кон јазел, во кој од некаква причина се генерира инверзна струја, се вклучи гранка која ќе ја апсорбира (конзумира) таа струја, несиметричниот режим се одстранува за целиот систем. На тој начин може да се симетрира дури и неполнофазниот режимот со прекината една или две фази. Како гранка со која се регулира конзумираната инверзна струја можат да бидат применети попречни кондензатори односно кондензаторски батерии. Нивното симетрирачко дејство се појавува само во случај, кога тие се вклучени несиметрично.

Ако батериите од три еднофазни кондензатори C_{ab} , C_{bc} и C_{ca} се поврзани во триаголник, тогаш тие се приклучени на меѓуфазните (линиски) напони. Во тој случај, со доволна точност

за во пракса, за пресметувањето на директните и инверзните струи можат да се користат следните изрази:

$$\underline{I}_d = j\omega \underline{U}_d / 3 \cdot (C_{ab} + C_{bc} + C_{ca}), \quad (4.29)$$

и

$$\underline{I}_i = j\omega \underline{U}_i / 3 \cdot (\underline{a} \cdot C_{ab} + C_{bc} + \underline{a}^2 \cdot C_{ca}). \quad (4.30)$$

Од изразот (4.29) следува, дека **компензирачкото дејство** на кондензаторите не зависи од нивната распределба помеѓу фазите, туку тоа се определува од вкупниот капацитет на кондензаторите коишто се вклучени во работа. Од изразот (4.30), пак, се добива правилото за симетрирање. Од тука следува важниот заклучок дека во мрежи со несиметрични режими, кондензаторските батерии за компензација на реактивните мокности можат да се искористат и за симетрирање на режимот без притоа да се намали нивното компензирачко дејство.

Намалувањето на нултите напони може да биде постигнато или преку намалување на нултата струја или преку намалување на вредноста на нултата импеданција во четириспроводните водови во нисконапонските мрежи.

Намалувањето на нултата компонента на струјата до некоја реално прифатлива вредност се постигнува преку израмнување на товарите во одделните фази. Тоа треба да се извршува систематски, не само на изводите на трансформаторските станици, туку и на приклучоците на поголемите станбени згради и други потрошувачи.

Балансирањето на товарите по одделните фази може да се изведе и со примена на затворени и полузатворени шеми на НН мрежи. Тоа е можно ако целата НН мрежа се напојува од еден заеднички дистрибутивен трансформатор бидејќи во тој случај не се создаваат струи на урамнотежување кои би ги зголемиле загубите на моќност во мрежата. Струите на урамнотежување би се појавиле доколку се изврши галванско поврзување на две или повеќе НН мрежи секоја напојувана од сопствен дистрибутивен трансформатор СН/НН.

Намалувањето на вредноста на нултата импеданција се врши со зголемување на пресекот на нултиот проводник, со намалување на должината на водовите, приклучени на дистрибутивниот трансформатор, со примена на трансформатори со шеми на соединување D/y₀ или Y/z₀, користење на неутралери и др.

Зголемувањето на пресекот на нултиот проводник може лесно да биде изведено кај НН надземни водови, кои обично се градат во реони со мала густина на товарите. Кај таквите мрежи кои се, по правило, прилично долги, обично е присутен висок степен на несиметрија на товарот. Во такви услови понекогаш се покажува дека е сосема оправдано пресекот на нултиот проводник да се иусвои да биде еднаков со пресекот на фазните проводници. Кабелските мрежи за НН обично се инсталираат во реони со поголема густина на товарите и имаат помала должина.

Тие се изведуваат со кабли кои имаат стандарден пресек на нултиот проводник. Потребата од зголемување на тој пресек треба да биде оправдана со специјални анализи и испитувања.

Познато е дека степенот на несиметрија на оптоварувањето во НН мрежи зависи од бројот на потрошувачи приклучени на мрежата. Колку е тој број поголем, толку ќе биде несиметријата помала – и обратно. Затоа намалувањето на должината на НН напојни водови доведува и до намалување на нивната нулта импеданција Z_0 . Но заедно со тоа се намалува и вкупниот конзум на водот а тоа, пак, доведува до зголемување на несиметријата во водот. Затоа моќноста на дистрибутивните трансформатори како и должината на НН изводи треба да се избираат врз основа на соодветни техничко-економски анализи со кои ќе се опфати и овој аспект.

Најдобри карактеристики во однос на нултата импеданција имаат трансформаторите со **шеми на соединување $Y/z0$** . Но тие трансформатори се и **најскапи** поради тоа што во себе содржат поголемо количество бакар во однос на трансформаторите со иста моќност и друга шема на соединување. Затоа се препорачува трансформаторите со шеми на соединување $Y/z0$ да се применуваат само во случаи на многу голема несиметрија. Во таа смисла почесто се применуваат трансформаторите со шема на соединување D/y_0 .

Неутралерите се електромагнетни апарати на чие магнетно коло е намотана трифазна намотка соединета во шема спротивна (свртена) искршена звезда (зиг-заг). Неутралерите имаат многу голема импеданција за директните и инверзните струи и во исто време многу мала импеданција за нултите струи. Како такви тие претставуваат потрошувачи на нултата компонента на струјата во мрежата, т.е. тие не дозволуваат нултите струи, генерирани во мрежата од несиметричниот конзум, да се пренесат надвор од неа, во СН и ВН дел од системот.

6. РЕЗИМЕ

Од претходно изнесеното произлегува констатацијата дека современиот технолошки развој и активностите на човекот, меѓу другите работи, доведуваат и до несакани ефекти. Аналогно со проблемот на загадување на човековата средина, во последните години сè повеќе е присутен проблемот со "загадувањето на ел. енергија" и со пречки и проблеми во ЕЕС. Сите тие аспекти се опфатени со општиот термин „квалитет на електричната енергија“.

Еден од поважните аспекти на овој проблем е појавата и присуството на виши хармоници во кривата на напонот, односно несинусоидалноста на напонот. Освен овој показател, за време на работата на електроенергетските мрежи треба да се следат и останатите показатели на електричната енергија од локален карактер, какви што се отстапувањето, варијациите (колебањата) и несиметријата на напонот.

Контролата на овие показатели и подобрувањето на квалитетот на електричната енергија е задача на електродистрибутивните компании. За таа цел е пожелно и потребно да се направи систем за собирање и обработка на податоците за квалитетот на електричната енергија и за однесувањето на разните видови електрични потрошувачи. Тоа ќе придонесе за утврдување на нормираните дозволени вредности и за периодично корегирање на параметрите на основните уреди и системи во средствата за автоматска регулација.

Посебно место помеѓу показателите на квалитетот на електричната енергија заземаат отстапувањето и варирањето на фреквенцијата. Но фреквенцијата е општо системски показател. Нејзината вредност во било кој временски момент е еднаква за целиот ЕЕС. Затоа постои можност проблемите со фреквенцијата во мрежата да бидат централно решавани, со мерење и споредување на моќностите на размена помеѓу агрегатите и потрошувачите и со одржувањето на балансот на таа размена а со тоа и на фреквенцијата во ЕЕС, на потребната вредност.

Затоа мерењата и мерените податоци од теренот, од т.н. "жива мрежа", се многу ценети, под услов тие да се правилно спроведени. Во врска со тоа произлегува и неопходноста од располагање со соодветна мерна апаратура со која ќе се овозможи:

- а) да се мерат сите показатели за квалитетот на електричната енергија одредени со стандард;
- б) добиената информација да има потреба од минимално дополнително обработување за добивање на интегрални статистички оценки за соодветните показатели.

Ваквите мерења се спроведуваат во индустриски поразвиените земји бидејќи тие се скапи, т.е. бараат скапа високостручна работна сила, скапи мерни уреди и др.

Покрај мерењето, подеднакво важно и моделирањето, односно симулацијата на појавите сврзани со квалитетот. Симулациите се прават со помош на софтверски пакети, односно програми за пресметка и симулација на вишите хармоници. Ова е особено важно во случаите каде што во даден дел од мрежата треба да се приклучи некој нов потрошувач за кој се знае дека е извор на виши хармоници. За таа цел е потребен професионален софтвер и негова примена во симулацијата на некои карактеристични случаи како и споредба на симулираните резултати со измерените.

Очигледно е дека обемот и сложеноста на задачите, сврзани со следењето и контролата на квалитетот на електричната енергија перманентно растат. Затоа работата врз контролата и подобрувањето на показателите за квалитет треба да биде систематска и сèопфатна. Акцентот на зафатите треба да се става врз проблемите кои можат да бидат решавани од самите електродистрибутивни претпријатија со помош на постојните средства за подобрување на квалитетот на електричната енергија. Наедно во материјалов се посочуваат и основните проблеми кои бараат нови истражувања и проучувања.

Сите методи за намалување или отстранување на соодветните нарушувања на показателите на квалитетот на електричната енергија, спомнати во предходниот дел, мора да бидат применувани и од страна на поголемите индустриски потрошувачи кои се всушност главните причинители за тие пречки и нарушувања. Тие методи и средства треба постојано да се усовршуваат и да се во чекор со новите трендови и барања кои нив им се налагаат. Во последниве години во високо-развиените земји се одвива интензивен развој во сите области од оваа проблематика. Тоа се одразува, пред сè, во:

- нормите и прописите коишто се однесуваат на нивото на емитираните пречки како и за мерните уреди и постапки;
- нагло паѓање на цената на досега прескапите мерни системи како последица на примената на мерни системи базирани на компјутери;
- развој на софтверски пакети за симулација на виши хармоници и нивни пресметки;
- развој на противмерки за сузбивање на влијанието на вишите хармоници и другите штетни последици во кои има уреди од највисока технологија.

Оваа област е во интензивен развој во скоро сите европски земји, за што сведочи и фактот дека насекаде се отвораат лаборатории и насоки (модули) по електротехничките факултети кои се бават со проучувањето на проблемот со квалитетот на електричната енергија.

Кај нас, во Македонија, при проектирањето на дистрибутивните мрежи треба да се располага со поцелосна информација за видот и карактерот на потрошувачите со цел да се предвиди нивното негативно влијание врз мрежата и со тоа однапред да се преземаат соодветни противмерки за намалување на тоа штетно влијание. При проектирањето на инсталациите во јавни згради и помалите индустриски потрошувачи треба да се води сметка и за енергетската согласност. Покрај критериумите за енергетска согласност, треба да се вметнат и критериумите за квалитет. Веќе е практично донесен новиот Закон за енергетика во кој се спомнува и поимот "квалитет" . Оној кој ја дава енергетската согласност ќе треба да утврди што значи новоприклучениот потрошувач од аспект на квалитетот на електричната енергија, дали тој квалитет ќе се влоши и под кои услови се одобрува согласноста. За тоа е потребно да се спроведат истражувања на модел, а исто така да се спроведуваат и соодветни мерења.

Во практиката се покажало дека доста проблеми со користењето на електричната енергија се припишуваат на неисправни и застарени инсталации, непостоење или неправилно изведено заземјување и слично. За тоа кај нас нема доволно сознанија и насобран статистички материјал. Се наметнува заклучокот дека во старите објекти мора да се прави контрола и евентуално промена на тие инсталации со цел да се избегне нивното штетно влијание врз квалитетот на електричната енергија.

Во минатото при проектирањето на мрежата не се земаше предвид технологијата која ќе се одвива во напојуваниот објект, што доведувало често и до влошен квалитет на електричната енергија. Денес веќе не е така. Се води сметка за технологијата на работата која ќе се одвива во предметниот објект а проектот ги опфаќа и третира сите потребни инсталации од јакострујни, слабострујни, надзорни, клима, греење, па сè до информациски инсталации.

Можеби овде треба да се спомене и кај нас востановената практиката напојната ТС СН/НН инвеститорот да му ја предава на одржување и во сопственост на електродистрибутивното претпријатие. Прашање е можеби дали, ако тој си ја задржи трафостаницата во своја надлежност, квалитетот на електро-снабдувањето би можел да биде и подобар?

Сето досега кажано се насоки и решенија кои ги применуваат високоразвиените земји во решавањето на проблемот со квалитетот на електричната енергија, а кои и кај нас се прифаќаат и веќе се реализираат или, пак, во перспектива треба да предстои нивно усвојување.