

### 3.9 Ефектите на хармониското изобличување

#### 3.9.1 Влијание врз кондензаторите

Присуството на напонски хармоници може да предизвика зголемени струи и зголемени напони на кондензаторите. Првата појава може да доведе до прегревање на кондензаторите и прегорување на заштитните осигурувачи, во крајна линија и електричен пробив. Втората појава може да доведе до електричен пробив. Во секој случај резултатот е предвремен испад од погон - хаварија.

ANSI/IEEE 18-1980 стандардот ги специфицира следните трајни кондензаторски параметри:

- 135 % од номиналната моќност (kVAr), наведена на натписната плочка;
- 110 % од номиналниот ефективен напон, вклучувајќи ги хармониците, а без транзиентите;
- 180 % од номиналната ефективна струја, вклучувајќи ги и основната и хармониската струја;
- 120 % од врвниот напон, вклучително и хармониците.

Табелата 3.1 е преглед на пример за оценка на кондензатор, со користење на компјутерска програма за табеларни пресметки, кој е згоден средство при оценка на различна оптовареност на кондензаторите.

**ТАБЕЛА 3.1 Пример за оценка на кондензатор (IEEE Standard 18-1980)**

Податоци за кондензаторската батерија<sup>1</sup>:

Ном. моќност на батеријата:	1.200	kvar
Номинален напон:	13.800	V (фаза-фаза)
Работен напон:	13.800	V (фаза-фаза)
Напојна компензација:	1.200	Kvar
Големина на основната струја:	50,2	A
Основна фреквенција:	60	Hz
Реактанса (капацитивна):	158.700	$\Omega$

Хармоничена состав на напонот на собирницата (добиена со мерење):

Хармоник бр.	Фреквенција (Hz)	Напон, $V_h$ % од основен	Напон, $V_h$ (V)	Линиска струја, $I_h$ % од основната
1	60	100,00	7967,4	100,00
3	180	0,00	0,0	0,00
5	300	4,00	318,7	20,00
7	420	3,00	239,0	21,00
11	660	0,00	0,00	0,00
13	780	0,00	0,00	0,00

<sup>1</sup> Примерот е земен од американска литература, затоа номиналните напони и фреквенцијата се невообичаени за нашите услови

17	1020	0,00	0,00	0,00
19	1140	0,00	0,00	0,00
21	1260	0,00	0,00	0,00
23	1380	0,00	0,00	0,00
25	1500	0,00	0,00	0,00

$$U_{neff} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967 \text{ V}$$

Изобличување на напонот:	5,00 %	$= \sqrt{4^2 + 3^2}$
Ефективен напон на кондензаторот:	7977,39 V	$= U_{neff} \sqrt{1^2 + 0,04^2 + 0,03^2}$
Изобличување на струјата на кондензаторот:	29,00 %	$= \sqrt{20^2 + 21^2}$
Ефективна струја на кондензаторот:	52,27 A	$= 50,2 \sqrt{1^2 + 0,2^2 + 0,21^2}$

Оценка на кондензаторската батерија:

	Пресметано (%)	Граница (%)	Надминување граница
Врвен напон <sup>2</sup>	107,0 (= 100 + 4 + 3)	120	Нема
Ефективен напон	100,1 (= $\frac{7977}{7967}$ )	110	Нема
Ефективна струја	104,1 (= $\frac{52,27}{50,2}$ )	180	Нема
Моќност, kVA <sub>r</sub>	104,3 ( $S = 3 \cdot U I = 3 \cdot 7977 \cdot 52,27$ )	135	Нема

Основната струја при полно оптоварување за 1200-kVA<sub>r</sub> кондензаторска батерија се одредува од:

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1200}{\sqrt{3} \times 13,8} = 50,2 \text{ A} \quad \dots [3.12]$$

каде  $Q_c$  е трифазната моќност на батеријата кондензатори (kVA<sub>r</sub>);  $U$  е линискиот напон во kV ефективна вредност.

Кондензаторот првенствено е изложен на два хармоника: петтиот и седмиот. Напонското изобличување содржи 4% од петтиот и 3% од седмиот. Ова резултира во 20% хармониска струја на петтиот и 21% хармониска струја од седмиот хармоник. Резултантните вредности во случајов се доволно под дозволената граница според стандардите, што се гледа од дното на табелата.

### 3.9.2 Влијание врз трансформаторите

Трансформаторите се проектирани да ја пренесуваат бараната моќност кон поврзаните потрошувачи, со минимални загуби, на

<sup>2</sup>Логично е да се смета дека темените вредности на вишите хармоници алгебарски се додаваат на темената вредност на основниот хармоник, бидејќи вишите хармоници се со повисока фреквенција и додека трае едната полупериода на основниот хармоник, врз неа во околината на нејзиниот максимум ќе се појават полупериодите и ќе се додаваат и во најлош случај сите би се совпаднале токму во темената вредност една врз друга.

индустриска фреквенција. Хармониската дисторзија (изобличеност), пред се кај струјата, а делумно и кај напонот, значајно ќе допринесе за додатното загревање. За да произведат трансформатор кој ќе се приспособи на повисоките фреквенции, проектантите прават разни варијанти на проекти, како што е користењето на континуирано транспониран кабел на местото од масивен проводник или ставањето на повеќе канали за ладење. Генерално правило е, трансформаторот во кој изобличувањето на струјата надминува пет проценти е кандидат за деноминирање (намалување на номиналната моќност, во оригинал на англ. "derating") поради хармоници.

Има три ефекти кои резултираат во зголемено загревање на трансформаторот, кога струјата на оптоварување вклучува хармониски компоненти:

1. *Ефективна вредност на струјата.* Ако трансформаторот е дизајниран само за номинален износ на моќност во kVA на оптоварувањето, хармониските струи можат да доведат до тоа да ефективната вредност на струјата на трансформаторот биде поголема од проектираната. Тоа пак резултира во зголемени загуби во проводниците (бакарот).

2. *Загуби од виорни струи.* Тоа се индуцираните струи во трансформаторот, причинети од магнетните флу克斯ови. Овие индуцирани струи течат низ намотките, во јадрото и низ другите проводни делови изложени на магнетното поле и создаваат додатни загуби. Оваа компонента на загубите во трансформаторот се зголемува со квадратот на фреквенцијата на струјата која ги предизвикува загубите поради виорни струи. Поради тоа, оваа станува многу важна компонента на загубите во сумата на загубите на трансформаторот кои предизвикуваат хармониско загревање.

3. *Загуби во јадрото.* Порастот на загубите во јадрото, во присуство на хармоници, ќе биде во зависност од ефектот на хармониците врз доведениот напон и од конструкцијата на самото јадро. Зголемувањето на напонското изобличување може да ги зголеми виорните струи во лимовите на јадрото. Последиците од сев ова се во директна зависност од дебелината на лимовите и од квалитетот на материјалот од кој е изработено јадрото. Зголемувањето на овие загуби поради хармоници, генерално, не е така критично, како во случајот со претходните два вида. (Ние ќе посматраме упростена оценка, каде овие загуби се занемаруваат).

Упатствата за деноминирање на трансформатор се детализирани во ANSI/IEEE Standard C57.110. Табелата 3.2 илустрира еден поедноставен приод<sup>3</sup>. Познатиот  $K$  фактор кој се користи во проблематиката на квалитетот на електричната енергија за деноминирање на трансформатор исто така е вклучен во таа табела.

### **Пример на деноминирање (дератирање) на енергетски трансформатор оптоварен со несинусоидална струја**

<sup>3</sup> Примерот е земен од американска литература, што може да се одрази на некои номинални вредности и соодветните пресметки

Ако трансформаторот е оптоварен со несинусоидална струја (присутни се виши хармоници), тогаш тој повеќе се загрева и треба да се декларира за помала моќност, односно да се “дератира” или “деноминира” и да му се одреди друга помала номинална моќност односно номинална струја. Составот на вишите хармоници обично е познат врз база на мерење. Се бара која е таа еквивалентна ефективна вредност на струјата од основниот хармоник која одговара на реалната состојба на изобличената струја која се јавува во праксата. Накусо, се бара еквиваленција на загубите при синусоидални услови за кои трансформаторот е проектиран, и за несинусоидални, во кои работи.

Да ги посматраме загубите на трансформаторот, бидејќи тие се меродавни за загревањето односно за номиналниот товар и номиналната струја која тој може трајно да ја поднесе.

**ТАБЕЛА 3.2 Поедноставен пример од C57.110 - Оценка на трансформатор и пресметка на  $K$ -фактор**

Пример					
Хармониска дистрибуција на трансформаторската струја на оптоварување:					
Хармоник	Струја (%)	Фреквенција (Hz)	Струја (е.г.)	I <sup>2</sup>	I <sup>2</sup> x h <sup>2</sup>
1	100,000	60	1,000	1,000	1,000
3	1,600	180	0,016	0,000	0,002
5	26,100	300	0,261	0,068	1,703
7	5,000	420	0,050	0,003	0,123
9	0,300	540	0,003	0,000	0,001
11	8,900	660	0,089	0,008	0,958
13	3,100	780	0,031	0,001	0,162
15	0,200	900	0,002	0,000	0,001
17	4,800	1020	0,048	0,002	0,666
19	2,600	1140	0,026	0,001	0,244
21	0,100	1260	0,001	0,000	0,000
23	3,300	1380	0,033	0,001	0,576
25	2,100	1500	0,021	0,000	0,276
Вкупно:				1,084	5,712
5,712/1,084				К фактор: 5,3	
Стандардно деноминирање (ANSI/IEEE C57.110-1986): 0,87 е.г.					
Претпоставен фактор на загуби поради виорни струи (P <sub>EC-R</sub> ) = 8 %					

Загубите под товар (Load Losses)  $P_{LL}$  се еднакви на збир на загуби во бакарот  $I^2 R$  (Џулови загуби) и загуби заради виорни струи (Eddy currents)  $P_{EC}$ , секаде каде тие струи може да се појават (во намотките, во железото, во казанот на трансформаторот, и во други конструктивни елементи каде може да проникнат растурните флуксеве). Така, во општ случај важи:

$$P_{LL} = I^2 R + P_{EC} \quad (\text{во физички единици, вати}) \quad (1)$$

Ако равенката (1) ја напишеме во единични големини (е.г; p.u, per unit) и за номинални услови, при синусоидална струја, важи:

$$P_{LL} = 1 + P_{EC-R} \quad (\text{во единични големини, p.u}). \quad (2)$$

Индексот  $R$  стои за да означи номинални услови (на англ. "Rated").

Загубите од виорни струи се пропорционални со квадратот на струјата и фреквенцијата (односно редот на хармоникот):

$$P_{EC} = K_{EC} I^2 h^2 = K_{EC} \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2 \quad (3)$$

каде  $K_{EC}$  е коефициент на пропорционалноста. Горната равенка треба да е задоволена и при постоење само на основниот хармоник и при постоење на сите хармоници од  $h_1$  до  $h_{\max}$ .

Ако посматраме случај на постоење на виши хармоници, при номинални вредности на загубите и изразено во единични вредности за сите струи ќе добиеме:

$$P_{LL} = \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 + \left( \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2 \right) P_{EC-R} \quad (\text{во единични големини}) \quad (4)$$

Овдека е  $P_{EC-R}$  фактор на загубите од виорни струи под номинален товар.

Факторот  $K$  кој се користи за дератирање на енергетски трансформатори се пресметува по формулата:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2} \text{ и одовде важи изразот кој покасно ќе го употребиме:}$$

$$\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2 = K \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 \text{ исто така изразена во единични големини.} \quad (5)$$

Ако ги комбинираме равенките (1), (4) и (5) ќе добиеме:

$$1 + P_{EC-R} = \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 + K \left( \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 \right) \times P_{EC-R} \quad (6)$$

Би можело да се рече дека левата страна важи за неизобличена струја, а десната за изобличена.

Се бара еквивалентна вредност на ефективната вредност на струјата  $\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2}$  која

ја задоволува оваа равенка. Ако решиме по  $\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2}$  ќе добиеме:

$$\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 = \frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K P_{EC-R}}$$

и одовде

$$I_{ef}(p.u.) = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K P_{EC-R}}} \quad (7)$$

каде  $P_{EC-R}$  = фактор на загуби поради виорни струи;

$h$  = реден број на хармоникот;

$I_h$  = хармониска струја.

Според тоа, деноминирањето на трансформатор може да се пресмета **ако се знае единичниот фактор на загуби поради виорните струи**. Тој фактор се определува на еден од следните начини:

1. Со негово добивање од производителот.
2. Со користење на податоците од трансформаторскиот тест и процедурата дадена во ANSI/IEEE Standard C57.110.
3. Преку типични вредности, базирани на типот на трансформаторот и неговата големина (види Табела 3.3).

**ТАБЕЛА 3.3 Типични Вредности за  $P_{EC-R}$**

Тип	MVA	Напон	% $P_{EC-R}$
Сув	$\leq 1$		3 – 8
	$\geq 1,5$	5 kV VN	12 – 20
	$\leq 1,5$	15 kV VN	9 – 15
Со масло	$\leq 2,5$	480 V NN	1
	2,5 до 5	480 V NN	1 – 5
	$> 5$	480 V NN	9 – 15

За горе наведениот пример важи:

$$I_{eff} \text{ (p.u.)} = \sqrt{\frac{1 + 0,08}{1 + 5,3 \times 0,08}} = 0,87 \text{ (p.u.)}$$

Според тоа е  $I_{ef} \text{ (A)} = 0,87 I_n \text{ (A)}$  односно при ист номинален напон моќноста треба да е 87% од номиналната моќност.

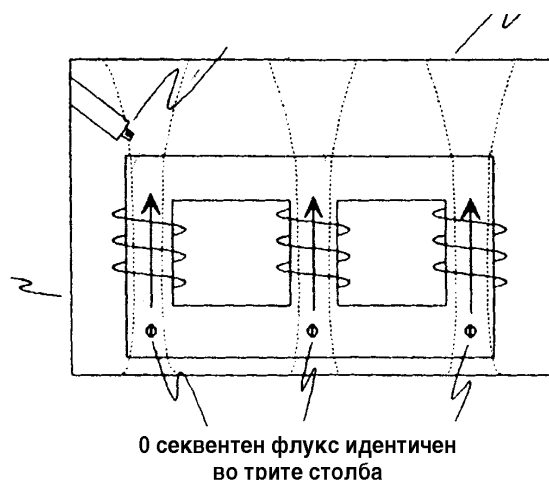
**Исклучоци.** Чести се случаите кога трансформаторите немаат проблем со хармоници според горните критеријуми, а сепак работат со зголемено загревање или неправилно, поради причина која изгледа дека е преоптоварување. Чест случај кај трансформаторите со заземјено ѕвездиште е што линиските струи содржат околу 8% од третиот хармоник, што е релативно ниско, а трансформаторот се загрева како да е барем номинално оптоварен. Зошто ваквиот трансформатор го поминува тестот за загревање во фабриката, а можеби и тестот за преоптоварување, а на крајот не работи како што се очекува од него, во праксата? Не земајќи ги во предвид евентуалните механички проблеми со ладењето, добри се шансите дека постои некој проводен елемент во магнетното поле што е под влијание на хармониски флуксови. Три од неколкуте можности се:

1. Флуксовите на нултата компонента ќе “избегаат” од јадрото на трансформатор со три столба, сл. 3.20.

Третиот, деветтиот, петнаесеттиот итн. хармоник се доминантно нулта компонента. Според тоа, ако врските на намотките одговараат да овозможат тек на струите на нултата компонента, овие хармониски флуксови можат да предизвикаат додатно загревање во резервоарите, стегите во јадрото итн. што не би можело да се открие при тестови со урамнотежени три фази или при еднофазните тестови. Осумте проценти

на линиска струја, споменати погоре, пренесуваат на неутралниот проводник струја со трет хармоник која е 24% од фазната струја. Дobar дел од флуксот се расејува околу јадрото и го опфаќа котелот и околниот простор. Симптоми дека се работи за ваков случај е појава на загарување и надување на бојата на казот или загревањето кој се манифестира на изводите (уводните изолатори на трансформаторот).

флукс во врска со држачот на може да осигурувачот или изолаторскиот увод      прегреани точки на казот предизвикаат испукана или нагорена боја



Сл.3.20. Флукс со нулти редослед во три столбен трансформатор влегува во резервоарот, воздухот и просторот за масло.

2. Еднонасочните изместувања во струјата можат исто така да допринесат флуксот да побегне преку границите на јадрото. Тоа ќе стане заситено до извесна мерка, на пример при позитивната полупериода, за разлика од негативната. Постојат многу електронски конвертори кои произведуваат бранови облици на струјата кои не се симетрични, или поради несакан случај или поради дизајнот. Ова може да резултира во мало еднонасочно изместување на страната на трансформаторот кон потрошувачот. И мала количина на еднонасочно изместување е доволна да предизвика проблеми кај повеќето енергетски трансформатори.

3. Може да постојат некои структури за затегање, фазните изводи или некој друг проводен елемент, кои се преблиску до магнетното поле. Тоа може да биде доволно мало по големина да не постои забележлив ефект во вид на загуби на индустриска фреквенција, но може да се создаде топла точка кога се има изложување на хармониски флуksови.

### 3.9.3 Влијание врз моторите

Моторите можат да бидат подвргнати на значајно напрегање поради изобличувањето на напонот. Хармониското изобличување на напонот на влезовите на моторот се пренесува во хармониски флуksови во моторот. Хармониските флуksови не учествуваат значајно во моментот на

моторот, но ротираат со фреквенција која е различна од синхроната фреквенција на роторот, индуцирајќи високофреквентни струи во роторот. Ефектот врз моторот е ист со тој на инверзната компонента на струјата на основна фреквенција: додатните флуksови индуцираат додатни загуби. Намалена ефикасност, заедно со загревање, вибрација и шумови, симптоми се за хармониско изобличување на напонот.

На хармониските фреквенции, моторите обично можат да се претстават преку реактансата на закочен ротор, поврзана во мрежата. Компонентите на хармонискиот напон од понизок ред, за кои величините се повисоки и привидната импеданса на моторот е пониска, обично се и најважните за моторите.

Обично нема потреба од деноминирање на моторите ако напонското изобличување останува во границите, пропишани од IEEE Standard 519-1992, кои се 5% *THD* и 3% за секој поединечен хармоник. Проблеми со загревањето се јавуваат кога изобличувањето на напонот достигнува 8 до 10% и повисоко. Таквата дисторзија треба да биде коригирана, ако се сака да се одржи работниот век на моторот.

Моторите се во паралела со импедансата на енергетскиот систем во однос на текот на хармониската струја, па генерално предизвикуваат намалување на мрежната индуктивност. Дали е ова штетно по системот, зависи од локацијата на резонанцијата на системот со вклучувањето на моторот. Моторите можат по малку да учествуваат во пригушувањето на некои од хармониските компоненти, во зависност од односот  $X/R$  во еквивалентното коло на закочениот ротор. Во системите со многу мотори со мали моќности, кои имаат низок  $X/R$  однос, ова може да помогне да се ослаби хармониската резонанција. Не може да се смета на ова кога станува збор за големи мотори.

### 3.10 Карактеристики на реакцијата (одговорот) на системот

Во енергетските системи, одговорот на енергетскиот систем е подеднакво важен како и изворите на хармоници. Всушност, енергетските системи се доста толерантни кон струите инјектирани преку оптоварувањата произведувачи на хармоници се додека постои некоја неповолна интеракција со импедансата на системот. Идентификувањето на изворите е само половина од работата при анализите на хармониците. Одговорот на енергетскиот систем на секоја хармониска фреквенција го одредува вистинското влијание на нелинеарното оптоварување врз изобличувањето на хармонискиот напон.

#### 3.10.1 Импеданса на системот

На индустриска фреквенција, енергетските системи првенствено се индуктивни и еквивалентната импеданса понекогаш се нарекува едноставно како реактанса на куса врска. Капацитивните влијанија по правило се занемарени во дистрибутивните и индустриските енергетски системи. Една од најчесто користените големини во анализите на хармониците на енергетскиот систем е импедансата на куса врска во



точката од мрежата каде е лоциран кондензаторот. Ако не е директно одредлива, може од податоците за моќноста на куса врска или за струјата на кусата врска, како што следува:

$$\underline{Z}_{sc} = R_{sc} + jX_{sc} = \frac{U_n^2}{S_{sc}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{sc}} \quad \dots [3.18]$$

каде  $\underline{Z}_{sc}$  е импедансата на куса врска, оми;

$R_{sc}$  е активна отпорност на куса врска, оми;

$X_{sc}$  е реактанса на куса врска, оми;

$U$  е линискиот напон (напон фаза-фаза), kV;

$S_{sc}$  е трифазна моќност на куса врска, MVA;

$I_{sc}$  е струјата на куса врска, kA.

$\underline{Z}_{sc}$  е фазорска големина, составена од активна отпорност и реактанса. Ако податоците за кусата врска не содржат информации за фазниот агол на  $\underline{Z}_{sc}$ , може слободно да се земе дека импедансата е чисто реактивна. Ова е посебно добра претпоставка за индустриските енергетски системи (за собирницата најблиска до напојната мрежа) и за повеќето електростопански. Кога тоа не е случај, треба да се направи напор пореалистички и поточно да се одреди активната отпорност бидејќи тоа ќе има влијание врз резултатите, кога ќе се земат предвид капацитетите.

Индуктивниот дел на импедансата  $\underline{Z}_{sc}$  се менува линеарно со фреквенцијата. Грешка во анализите на хармониците се прави кога се заборава да се пресмета реактансата на фреквенцијата на хармоникот. Реактансата на  $h$ -тиот хармоник се одредува од реактансата на основната импеданса,  $X_1$ , според:

$$X_h = hX_1 \quad \dots [3.19]$$

А како стои работата со активните отпори? Дали и тие зависат од фреквенцијата? За жал, да! Но во повеќето енергетски системи, генерално може да се претпостави дека активната отпорност не се менува значајно, разгледувајќи ги ефектите од хармониците пониски од деветтиот. За водовите и каблите, активната отпорност варира со квадратниот корен на фреквенцијата, на повисока фреквенција кога скин ефектот станува значаен во проводникот. Исклучок од правилото е случајот кај некои трансформатори. Поради загубите поради виорни струи од растурните флуksови, привидната активна отпорност кај поголемите трансформатори може да варира скоро пропорционално со фреквенцијата. Ова може да има многу добар ефект врз пригушувањето на резонанцијата, како што ќе се види подолу. Во помалите трансформатори, помали од 100 kVA, активната отпорност на намотките е често толку голема, споредбено со другите импеданси, што ги засенува ефектите од виорните струи од растурните флуksови и има мала промена во целата привидна активна отпорност, се додека фреквенцијата не достигне 500 Hz. Секако, помалите трансформатори можат да имаат однос  $X/R$  од 1,0 до 2,0 на основна

фреквенција, додека кај големите трансформатори во потстанции, овој однос достигнува вредност меѓу 20 и 30. Според тоа, ако собирницата која се проучува е доминирана од трансформаторската импеданса а не од импедансата на доводниот вод, моделот на системската импеданса треба да се разгледува повнимателно. Занемарувањето на активната отпорност може да доведе до предвидувања за преголемо хармониското изобличување.

Во индустриските енергетски системи, еквивалентната реактанса на системот често е доминирана од импедансата на напојниот трансформатор. Добра апроксимација за  $X_{sc}$  може да се базира на импедансата на трансформаторот  $X_{tx}$ , ако:

$$X_{sc} \approx X_{tx} \quad \dots [3.20]$$

Иако ова равенство не е сосема точно, сепак општо важи дека импедансата на трансформаторот е барем 90% од вкупната импеданса, а обично е и повеќе. Ова обично е доволно да се пресмета дали ќе има или не значаен проблем со хармониска резонанција. Импедансата на трансформаторот во оми може да се определи од процентната импеданса на куса врска,  $u_k$ , која се наоѓа на натписната плочка на трансформаторот преку равенката: ( $U_n$  е номиналниот линиски напон, а  $S_{tx}$  е номиналната привидна моќност):

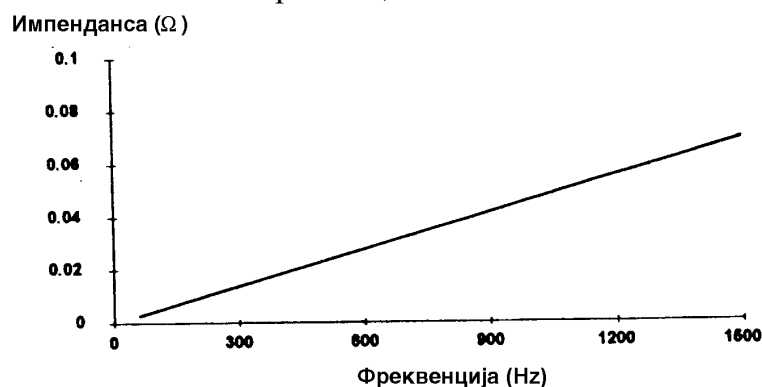
$$X_{tx} = \frac{U_n^2}{S_{tx}} \times \frac{u_k [\%]}{100} \quad \dots [3.21]$$

Ова создава претпоставка дека импедансата е доминантно реактивна. На пример, за трансформатор од 1500 kVA,  $u_k = 6\%$ , еквивалентната импеданса на страната од 480 волти<sup>4</sup> е:

$$X_{tx} = \frac{U_n^2}{S_{tx}} \frac{u_k [\%]}{100} = \left( \frac{0,480^2}{1,5} \right) \times 0,06 = 0.0092 [\Omega] \quad \dots [3.22]$$

Зависноста на импедансата од фреквенцијата за индуктивен систем ќе изгледа како на слика 3.21.

Реалните енергетски системи не се однесуваат така едноставно. Ваков поедноставен модел ја занемарува капацитивноста, што не смее да се направи во анализите на хармониците.



<sup>4</sup> пример земен од американска литература

## Сл.3.21 Зависност на импедансата од фреквенцијата за индуктивен систем

**3.10.2 Импеданса на кондензатор**

Кондензаторите (кои се поврзуваат паралелно, меѓу фаза и земја), употребени било кај потрошувачите за корекција на факторот на моќност, било во самиот електростопански дистрибутивен систем, драматично ја менуваат зависноста на импедансата на системот од фреквенцијата. Кондензаторите не создаваат хармоници, но извесно хармониско изобличување сепак можат да му се припише на нивното присуство. Додека реактансата на индуктивните компоненти се зголемува пропорционално со фреквенцијата, капацитивната реактанса,  $X_c$ , зависи обратно пропорционално со  $f$ :

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad \dots [3.23]$$

каде  $C$  е капацитетот, во фаради. Оваа големина ретко е позната кај енергетските кондензатори. За нив обично е позната капацитивната моќност во kVAr или MVA при даден напон. Еквивалентната капацитивна реактанса **по фаза** на основна фреквенција за кондензаторска батерија, може да се определи од:

$$X_c = \frac{U_n^2}{S_c} \quad (U_n \text{ во kV, } S_c \text{ во MVA, и } X_c \text{ во } \Omega) \quad \dots [3.24]$$

За трифазни батерии, се заменува линискиот напон и трифазната реактивна моќност. За трифазна, 1200-kVAr, 13,8-kV-на кондензаторска батерија, реактансата на директната компонента во оми ќе биде:

$$X_c = \frac{U_n^2}{S_c} = \frac{13,8^2}{1,2} = 158,7 [\Omega] \quad \dots [3.25]$$

**Вежби:**

### **Пресметка на импедансите на елементите на Електроенергетскиот систем**

Пресметката на импедансите на енергетскиот систем е потребна со цел да се проучува однесувањето на електроенергетскиот систем при нормален погон или во случај на грешки (куси врски). Најважни елементи на еден електроенергетски систем се генераторите, трансформаторите, водовите, каблите, моторите. Исто така и други потрошувачи. За мрежите од повисока класа на напон најважни се реактансите (индуктивните отпори). Тие лесно може да се добијат односно пресметаат врз основа на каталошките податоци (т. нар. податоци од “натписната плочка”) на уредите - елементите.

**Физички величини.** За опис на стационарната состојба на системот потребни се четири величини и тоа: Ќе ги бележиме со нивните

вообичаени ознаки, големи латински букви и тоа, напон  $U$ , струја  $I$  импеданса  $Z$  и моќност  $S$  чии единици се ампер (A), волт (V), ом ( $\Omega$ ), ват (W). Сите тие се поврзани преку законите на електротехниката, омов закон, равенката за моќност и сл.

Под физичка величина на еден елемент разбираме едно мерливо својство на тој елемент, процес или состојба, со кое може да се вршат операциите собирање, одземање, и така важи:

величина = бројна вредност  $\times$  единица.

Физичките величини ги изразуваме во SI системот на единици. Дозволен се префиксите мили, микро, мега, тера.

**Релативни величини (per unit, p.u.).** Кај релативните величини единицата за мерење по дефиниција е еден, бидејќи тие се дефинираат како однос:

$$\text{релативна величина} = \frac{\text{величина}}{\text{базисна величина}}$$

Бидејќи четирите величини кои ни се нужни (напон, струја, импеданса и моќност) меѓусебно се поврзани со закони, за да се воспостави систем од релативни величини, потребни ни се само две базисни величини. Обично како базисни величини се одбираат напонот и моќноста. Така се добиваат прочуениот “per unit” (п.у.) систем омилен во англиското говорно подрачје, а се применува и кај нас.

Нека ги бележиме овие величини со мала буква и апостроф пред буквата. Сите импеданси треба да бидат пресметани на исто напонско ниво. При овој систем некои величини се усвојуваат за базисни (обично  $U_B$  и  $S_B$ ), и со нивна помош се изразуваат другите. Но и за другите величини може да се пресмета соодветна базна величина, врз основа на усвоените. Бидејќи величините меѓу себе се поврзани со законите на електротехниката, и меѓу базните величини ќе важат аналогни релации:

$$S_B = \sqrt{3}U_B I_B \quad (1); \quad U_B = \sqrt{3}I_B Z_B \quad (2)$$

Ако за базисни величини се усвојат  $U_B$  и  $S_B$ , за сите други изразени преку нив ќе бидат:

$$'u = \frac{U}{U_B} \quad (3); \quad 'i = \frac{I}{I_B} \quad (4); \quad 's = \frac{S}{S_B} \quad (5); \quad 'z = \frac{Z}{Z_B} \quad (6)$$

Ако се искористат (1) и (2) за импедансата во единични големини ќе се добие:

$$'z = \frac{Z}{Z_B} = \frac{\sqrt{3}I_B}{U_B} Z = \frac{S_B}{U_B^2} Z \quad (7)$$

**Полурелативни величини.** Овој систем е познат уште и под ознаката  $\frac{\%}{MVA}$  и е омилен во германската практика. При овој систем се усвојува само една базна величина и тоа напонот  $U_B$ . Овој систем е многу едноставен и згоден за примена. Табелата 1 дава преглед на дефинициите на двата погоре спомнати системи.

Табела 1: дефиниција на системите за пресметка на величините

Физички единици Ом систем Нема базисна величина	р.и систем (релативни единици) две базисни величини, $U_B, S_B$	$\frac{\%}{MVA}$ систем полурелативни единици една базисна величина $U_B$
Напон $U$	$'u = \frac{U}{U_B}$	$u = \frac{U}{U_B} 100 \text{ (\%)}$
Струја $I$	$'i = I \frac{U_B}{S_B}$	$i = I U_B \text{ (MVA)}$
Импеданса $Z$	$'z = \frac{Z S_B}{U_B^2}$	$z = \frac{Z}{U_B^2} \left( \frac{\%}{MVA} \right)$
Моќност $S$	$'s = \frac{S}{S_B}$	$s = S \times 100 \left( \frac{\%}{MVA} \right)$

Претворањето од еден во друг систем е дадено во табелата 2:

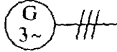

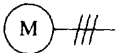
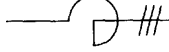
Табела 2: Претворање од ом - систем во  $\frac{\%}{MVA}$  систем и обратно

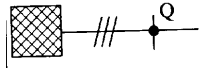

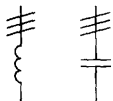
Од $\frac{\%}{MVA}$ во ом - систем	Од ом - систем во $\frac{\%}{MVA}$
$U \text{ (kV)} = u \text{ (\%)} \frac{1}{100} U_B \text{ (kV)}$	$u \text{ (\%)} = U \frac{1}{U_B \text{ (kV)}} 100$
$I \text{ (кА)} = i \text{ (MVA)} \frac{1}{U_B \text{ (kV)}}$	$i \text{ (MVA)} = I \text{ (кА)} U_B \text{ (kV)}$
$Z(\Omega) = z \left( \frac{\%}{MVA} \right) \frac{(U_B \text{ (kV)})^2}{100}$	$z \left( \frac{\%}{MVA} \right) = Z(\Omega) \frac{100}{(U_B \text{ (kV)})^2}$
$S \text{ (MVA)} = s \left( \frac{\%}{MVA} \right) \frac{1}{100}$	$s \left( \frac{\%}{MVA} \right) = S \text{ (MVA)} 100$

Пресметките на импедансите односно на реактансите на уредите се врши со помош на каталожките податоци (податоци од натписната плочка) или геометриските димензии.

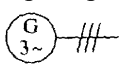
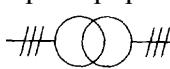
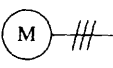
Табелата 3 дава преглед на пресметките на импедансите на уредите во ом системот, а табелата 4 - во системот  $\frac{\%}{MVA}$ .

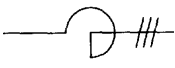
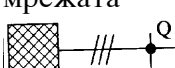
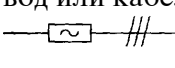
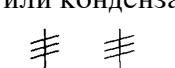
Табела 3: Пресметка на импедансите на елементите од системот во  $\Omega$ 

Елемент/апарат	Импеданса за директен систем	Забелешка
Синхрона машина (генератор, мотор) 	$X_G = \frac{x_d''(\%) U_{nG}^2}{100 S_{nG}}$	$x_d''$ субтранзиентна реактанса во %; $S_{nG}$ номинална моќност
	$R_{sG} = 0,05 X_G; S_{nG} \geq 100 MVA$ $R_{sG} = 0,07 X_G; S_{nG} < 100 MVA$	
Трансформатор 	$Z_T = \frac{u_{kT}(\%) U_{nT}^2}{100 S_{nT}}$ $R_T = \frac{u_{kr}(\%) U_{nT}^2}{100 S_{nT}}$ $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$	$U_{nT}$ номиналниот напон на трансформаторот, на NN страна или на VN страна $S_{nT}$ номиналната моќност на трансформаторот $u_k(\%)$ напон на куса врска на трансформаторот во %
		За високонапонски трансформатори важи $X_T \approx Z_T$
Асинхрон мотор 	$X_M = \frac{I_{nM}}{I_a} \frac{U_{nM}^2}{S_{nM}}$ $R_M = 0,1 X_M$ ако $P_{nMp} \geq 1 MW$ $R_M = 0,15 X_M$ , ако $P_{nM} < 1 MW$	$S_{nM}$ номинална привидна моќност $S_{nM} = \frac{P_{nM}}{\eta \cos \varphi}$ ; $I_a$ струја на пуштање на моторот $I_{nM}$ номинална струја на моторот. $P_{nM}$ номинална моќност кај високонапонски мотори.
	$R_M = 0,42 X_M$	Нисконапонски мотори, заедно со приклучниот кабел
Реактор за ограничување на струјата 	$X_D = \frac{u_r(\%) U_{nD}^2}{100 S_{nD}}$	$S_{nD}$ проодна привидна моќност $S_{nD} = \sqrt{3} U_{nD} I_{nD}$ $I_{nD}$ номинална струја $U_{nD}$ номинален напон $u_r$ номин. пад на напон, %
Импеданса на напојување во мрежата	$Z_Q = \frac{1,1 U_{nQ}^2}{S_{kQ}''}$	$S_{kQ}''$ почетна моќност на куса врска во местото на

	$X_Q = 0,995Z_Q$	прикључување $Q$ $U_{nQ}$ номин. напон на мрежата
	$R_Q = 0,1X_Q$	Ако нема поточни податоци
Преносен надземен вод или кабел 	$X_L = X'_L \ell; R_L = R'_L \ell$	$X'_L, R'_L$ се специфични отпори по единица должина
Паралелно приклучен реактор или кондензатор 	$X_D = \frac{U_n^2}{S_{nD}}; X_C = \frac{U_n^2}{S_{nC}}$	$S_{nD}, S_{nC}$ се номиналните моќности $U_n$ е номиналниот напон

Табела 4: Пресметка на импедансите на елементите од системот во %/MVA

Елемент/апарат	Импеданса за директен систем	Забелешка
Синхрона машина (генератор, мотор) 	$X_G = \frac{x_d''}{S_{nG}}$ $r_{sG} = 0,05x_G; S_{nG} \geq 100MVA$ $r_{sG} = 0,07x_G; S_{nG} < 100MVA$	$x_d''$ субтранзиентна реактанса во %; $S_{nG}$ номинална моќност
Трансформатор 	$z_T = \frac{u_{kT}}{S_{nT}}$ $r_T = \frac{u_{kr}}{S_{nT}}$ $x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}$	$U_{nT}$ номиналниот напон на трансформаторот, на NN страна или на VN страна $S_{nT}$ номиналната моќност на трансформаторот $u_k$ (%) напон на куса врска на трансформаторот во % За високонапонски трансформатори важи $X_T \approx Z_T$
Асинхрон мотор 	$x_M = \frac{I_{nM}}{I_a} \frac{100\%}{S_{nM}}$	$S_{nM}$ номинална моќност $S_{nM} = \frac{P_{nM}}{\eta \cos \varphi}; I_a$ струја на пуштање на моторот $I_{nM}$ номинална струја на моторот.
	$r_M = 0,1x_M$ ако $P_{nMp} \geq 1MW$ $r_M = 0,15x_M$ , ако $P_{nM} < 1MW$	$P_{nM}$ номинална моќност кај високонапонски мотори.
	$r_M = 0,42x_M$	Нисконапонски мотори,

		заедно со приклучниот кабел
Реактор за ограничување на струјата 	$x_D = \frac{u_r}{S_{nD}}$	$S_{nD}$ проодна привидна моќност $S_{nD} = \sqrt{3}U_{nD}I_{nD}$ $I_{nD}$ номинална струја $U_{nD}$ номинален напон $u_r$ номин. пад на напон, %
Импеданса на напојување во мрежата 	$z_Q = \frac{110\%}{S_{kQ}''}$ $x_Q = 0,995z_Q$	$S_{kQ}''$ почетна моќност на куса врска во местото на прикључување $Q$ $U_{nQ}$ номин. напон на мрежата
	$r_Q = 0,1x_Q$	Ако нема поточни податоци
Преносен надземен вод или кабел 	$x_L = \frac{X'_L \ell 100\%}{U_n^2};$ $r_L = \frac{R'_L \ell 100\%}{U_n^2}$	$X'_L, R'_L$ се специфични отпори по единица должина $U_n$ е номиналниот напон на кој се наоѓа водот
Паралелно приклучен реактор или кондензатор 	$x_D = \frac{100\%}{S_{nD}}; x_C = \frac{100\%}{S_{nC}}$	$S_{nD}, S_{nC}$ се номиналните моќности $U_n$ е номиналниот напон

**Напомена:** Ако не се располага со точни податоци од натписната плочка на апаратот - уредот, во прирачници и каталози може да се најдат вообичаени вредности за напонот на куса врска и други податоци за трансформаторите, како и подолжни отпори и реактанси по единица должина за преносните водови и кабелите, зависно од нивниот тип и конструкција.

### Примери на пресметка во ом - системот

За почеток ќе дадеме примери на пресметка во ом - системот како поразбирливи за студентите.

1. Дадена е синхрона машина со  $S_{nG}=50$  MVA;  $U_{nG}=10,5$  kV;  $\cos \varphi_G=0,8$ ;  $x_d''=14,5\%$

**Решение:**  $X_G = \frac{x_d''(\%) U_{nG}^2}{100 S_{nG}} = (14,5/100)/(10,5^2/50) = 0,32 \Omega$

$R_G = 0,07 X_G = 0,0224 \Omega.$

2. Даден е двонамотен трансформатор:  $S_{nT}=50$  MVA;  $\frac{U_1}{U_2}=110$  kV/10,5 kV;  $u_k=10\%$ ;  $u_{kr}$



=0,5% или моќноста на загубите во бакарот  $P_{Cu}=249 \text{ kW}$

**Решение:**  $Z_T = \frac{u_k(\%) U_1^2}{100 S_{nT}} = (10\%/100)(110^2/50) = 24,2 \text{ } \Omega$  (пресметано на 110 kV

напонска страна)

$R_T = \frac{u_{kr}(\%) U_1^2}{100 S_{nT}} = (0,5\%/100)(110^2/50) = 1,21 \text{ } \Omega$  сведено на 110 kV напонска

страна

$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 24,17 \text{ } \Omega$  сведено на 110 kV напонска страна.

### 3. Импеданса на погорната мрежа во точката на приклучување.

$S_{kQ}'' = 2000 \text{ MVA}$ ;  $U_{nQ} = 110 \text{ kV}$

**Решение:**  $Z_Q = \frac{1,1 U_{nQ}^2}{100 S_{kQ}''} = 1,1(110^2)/(100 \times 2000) = 0,06655 \text{ } \Omega$ .

$X_Q = 0,995 Z_Q = 0,06622 \text{ } \Omega$ ;  $R_Q = 0,1 Z_Q = 0,0066 \text{ } \Omega$

### 4. Кабел за наизменична струја тип N2XSY 18/30 kV 1×500 RM/35

$R_L' = 0,0366 \text{ } \Omega/\text{km}$ ;  $X_L' = 0,112 \text{ } \Omega/\text{km}$ ;  $\ell = 10 \text{ km}$ ;  $U_n = 30 \text{ kV}$ .

**Решение:**  $R_L = R_L' \ell = 0,0366 \text{ } \Omega/\text{km} \times 10 \text{ km} = 0,366 \text{ } \Omega$ .

$X_L = X_L' \ell = 0,112 \text{ } \Omega/\text{km} \times 10 \text{ km} = 1,12 \text{ } \Omega$ .

### 5. Реактор за ограничување на струјата на куса врска

$u_{nD} = 5\%$ ;  $I_{nD} = 500 \text{ A}$ ;  $U_n = 10 \text{ kV}$ .

**Решение:**  $X_D = \frac{u_{nD}(\%) U_{nD}^2}{100 \sqrt{3} I_{nD} U_{nD}} = (5 \times 10^2)/(100 \sqrt{3} \times 10 \text{ kV} \times 0,5 \text{ kA}) = 0,577 \text{ } \Omega$ .

Да пресметаме неколку импеданси и во системот  $\%/MVA$  за истите случаи:

### 6. Трансформатор, истиот случај како погоре во $\%/MVA$

**Решение:**  $z_T = \frac{u_k}{Z_n} = \frac{10\%}{50 MVA} = 0,2 \frac{\%}{MVA}$   $r_T = \frac{u_{kr}}{S_{nT}} = \frac{0,5\%}{50 MVA} = 0,01 \frac{\%}{MVA}$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2} = 0,1997 \frac{\%}{MVA}$$

### 7. Мрежа во приклучната точка Q, истиот случај како погоре во $\%/MVA$

**Решение:**  $z_Q = \frac{110\%}{S_k''} = \frac{110\%}{2000 MVA} = 0,055 \frac{\%}{MVA}$ .

$$x_Q = 0,995 z_Q = 0,9547 \frac{\%}{MVA} \quad r_Q = 0,1 z_Q = 0,0055 \frac{\%}{MVA}$$

**8.Кабел (истиот случај како погоре) во % / MVA**

**Решение:**  $r_L = (R' \ell 100\%) / U_n^2 = \left( 0,0366 \frac{\Omega}{km} 10km 100\% \right) / (30kV)^2 = 0,041 \frac{\%}{MVA};$

$$x_L = (X' \ell 100\%) / (U_n^2) = \left( 0,112 \frac{\Omega}{km} 10km 100\% \right) / (30kV)^2 = 0,124 \frac{\%}{MVA}.$$

**9.Реактор, случај исто како погоре, во % / MVA:**

**Решение:**  $x_D = \frac{u_{rD}(\%)}{\sqrt{3} U_{nD} I_{nD}} = \frac{5\%}{\sqrt{3} 10kV 0,5kA} = 0,577 \frac{\%}{MVA}.$

**3.10.3 Паралелна резонанција**

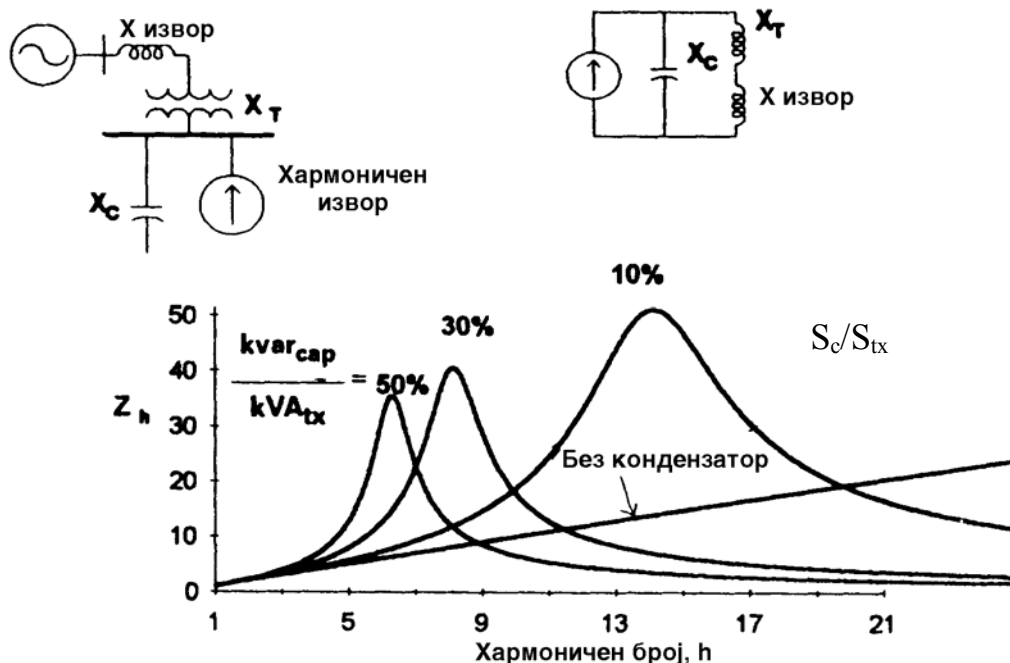
Сите кола кои содржат и капацитивност и индуктивност, имаат една или повеќе природни (сопствени) фреквенции. Кога една од тие фреквенции се совпаѓа со фреквенцијата која ја наложува енергетскиот систем, може да дојде до појава на резонанција, при која напоните и струите на таа фреквенција продолжуваат да постојат со многу високи вредности. Тоа е објаснувањето на повеќето проблеми со хармониското изобличување во енергетските системи.

На хармониските фреквенции, посматрано од перспектива на хармониските извори, паралелно поставените кондензатори се појавуваат во паралела со еквивалентната импеданса на системот, како што е покажано на Слика 3.22.

На фреквенции различни од основната, генераторите на енергетскиот систем претставуваат куса врска. Тие се извор само за основната фреквенција. На фреквенциите каде  $X_c$  и вкупната реактанса на системот  $X_m$  се еднакви, привидната импеданса на паралелната комбинација  $Z_h$  од индуктивитетот и капацитетот, станува многу голема. Ова резултира во типични услови на паралелна резонанца. Ефектот на менувањето на големината на кондензаторот врз импедансата, гледано од изворот на хармоници, може да се види на истата слика, од каде се гледа и споредбата со случајот кога нема кондензатор. Јасно е дека ако еден од максимумите се совпаѓа со фреквенцијата на хармониската струја произведена од потрошувачот, ќе има многу поголем напонски пад во еквивалентната импеданса  $Z_h$ , отколку без кондензатори.

(а) Систем со потенцијал за проблеми со паралелна резонанција

(б) Еквивалентно коло



Фреквентен одговор на системот со промена на капацитетот изразен релативно во однос на трансформаторот  $Z_1=1.0$

Параметар за разните криви е односот  $\frac{S_c}{S_{tx}}$ .  $Z_h$  е паралелна комбинација на  $X_c$  и вкупниот

индуктивитет на напојната мрежа на дадена фреквенција  $h$ ;  $Z_h = X_c \parallel (X_T + X_{извор})$

Сл.3.22 Влијаније на величината на кондензаторот врз паралелната резонантна фреквенција

Резонантната фреквенција за индуктивно-капацитивна комбинација може да се пресмета со повеќе формули, во зависност од расположливите податоци. Основната равенка за резонантната фреквенција е:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \dots [3.26]$$

Аналитичарите на енергетскиот систем обично ги немаат податоците за вредностите на  $L$  и  $C$ , па преферираат други изрази. Имено, тие го пресметуваат резонантниот хармоник,  $h_r$ , базиран на импедансите на основната фреквенција, користејќи се со:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} = \sqrt{\frac{S_{sc}}{S_c}} \approx \sqrt{\frac{S_{tx} \times 100}{S_c \times u_k (\%)}} \quad \dots [3.27]$$

каде:  $h_r$  = резонантен хармоник;

$X_c$  = реактанса на кондензаторот, оми;

$X_{sc}$  = реактанса на куса врска на системот, оми;

$S_{sc}$  = моќност на куса врска на системот, MVA;

$S_c$  = номинална моќност на кондензаторската батерија, MVA;

$S_{ix}$  = моќност на понижувачкиот (step-down) трансформатор, kVA;

$u_k(\%)$  = импеданса на куса врска понижувачкиот трансформатор

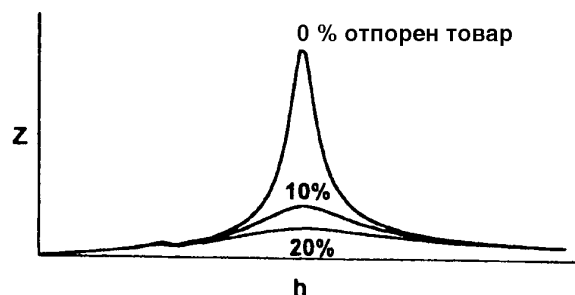
изразена во проценти;

На пример, за индустриска собирница каде импедансата на трансформаторот е доминантна, резонантниот хармоник за 1500-kVA, 6 % -ен трансформатор и 500-kVA кондензаторска батерија е:

$$h_r \approx \sqrt{\frac{S_{ix} 100}{S_c u_k(\%)}} = \sqrt{\frac{1500 \times 100}{500 \times 6}} = 7,07 \quad \dots [3.28]$$

### 3.10.4 Ефектот на активната отпорност и активниот товар

Фактот што резонантната фреквенција се совпаѓа со доминантниот хармоник на хармонискиот извор, не секогаш е причина за аларм. Пригушувањето што го создава активната отпорност во системот е често доволно да спречи катастрофални напони и струи. Сликата 3.23 ги покажува карактеристиките на импедансата на паралелно резонантно коло, за различни големини на активен товар, во паралела со капацитетот. Само 10% активна отпорност може да има корисно влијание врз врвната импеданса. Ако станува збор за значителна должина на линиите или каблите помеѓу кондензаторската собирница и најблискиот напоен трансформатор, резонансата ќе биде придушена. Водовите и каблите можат да претставуваат значаен удел на активна отпорност во еквивалентното коло. Отпорите на водовите и потрошувачите се причина што ретко се случуваат катастрофални последици од резонанција врз кондензаторите во дистрибутивниот систем. Тоа не значи дека нема да се појават резонанции, но општо земено нема да настане оштетување на компонентите на електроенергетскиот систем.



Слика 3.23. Ефект на отпорен товар врз паралелната резонанса

Најпроблематичните резонантни услови се појавуваат кога кондензаторите се инсталирани на собирниците во дистрибутивната трафостаница или во индустриските разводни постројки. Во овие случаи,

кога трансформаторот доминира со импедансата на системот и има висок  $X/R$  однос, релативната активна отпорност е мала и соодветниот врв на импедансата на паралелната импеданса е многу остар и висок. Ова е заедничка причина за дефекти на кондензатор, на трансформатор или на останатата опрема на оптоварувањето. Кога се поставуваат кондензаторите во индустриските погони и во дистрибутивните трафостаници, секогаш треба да претходи анализа за опасноста од резонанција.

Според кажувањата на инженерите од праксата, кај околу 20% од индустриските инсталации, за кои не се направени претходни студии, се јавуваат прекини и дефекти како последица на резонанса. Всушност, одбирајќи ја големината на кондензаторот, со кој се сака да се корегира факторот на моќност, со користење од спецификацијата на производителот на кондензатори и правејќи ги пресметките врз база на средната месечна сметка за реактивна енергија, се оди во тенденција што резултира во комбинација што го ја доведува резонанцијата на системот во близина на петтиот хармоник. Ова е еден од најлошите хармоници на кој би се погодила резонанцијата, бидејќи тој е постојано најголемата компонента во трифазните системи.

Погрешна е помислата дека активните оптоварувања ги пригушуваат хармониците оти, во отсуство на резонанција, оптоварувањата од секаков вид ќе имаат мал удел во хармониските струи и резултантното напонско изобличување. Повеќето од струите на вишите хармоници ќе течат назад кон енергетскиот извор. Како и да е, може да се рече дека активните товари ќе ја пригушуваат *резонансијата*, што ќе води кон значителна редукција на хармониското изобличување.

Моторните оптоварувања се првенствено индуктивни и не создаваат големи придушувања. Тие пак, можат да го зголемат изобличувањето, преку менување на резонантната фреквенција на системот поблиску до некој значаен хармоник. Малите мотори, со моќност во ранг на дел од коњска сила, имаат значаен удел во придушувањето оти кај нив односот  $X/R$  е помал отколку кај големите мотори.

**Вежби: Повторувае за појавата резонанција**

### **Резонанција во сериско и паралелно $RLC$ коло**

Појавата резонанција е тесно поврзана со проблематиката на квалитетот на електричната енергија, бидејќи некои проблеми со квалитетот на електричната енергија настануваат при услови на резонанција или блиску до резонанција. Општо, под резонанција во едно електрично коло ја разбираме состојба кога импедансата на тоа коло достигнува екстрем - минимум или максимум. На пример, сериското  $LC$

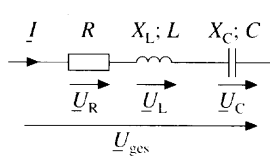
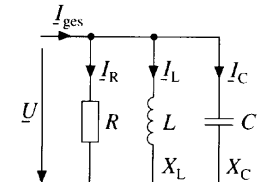
коло има импеданса:  $Z(\omega) = j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$  која има екстрем на модулот  $|Z| = 0$

за  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Исто така, екстрем (максимум) на  $|Z|$  постои и за  $\omega \rightarrow 0$  и

$\omega \rightarrow \infty$  кога е  $|Z| = \infty$ .

Во табелата 1 наброени се својствата на сериско и паралелно резонантно коло.

Табела 1: Сериско и паралелно резонантно коло

тип	Импеданса при резонанција (модул)	Адмитанса при резонанција (модул)	Резонантна фреквенција	шема
Сериско	Минимум	Максимум	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	
Паралелно	Максимум	Минимум	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	

Барањето на резонантните услови (резонантната фреквенција  $\omega_{rez}$ ) се сведува на барање на екстрем на функцијата  $|Z(\omega)|$ . Најчесто се истражува импедансата на некоја собирница на енергетскиот систем каде се приклучуваат потрошувачите (така наречена “точка на заедничко приклучување”, или “point of common coupling”, PCC). Колото и неговата еквивалентна шема во реалниот енергетски систем може да е многу сложено и не е лесно да се одреди резонантната фреквенција. Но по нумерички пат може да се заменуваат разни вредности на фреквенцијата  $\omega$ , систематски почнувајќи од некоја мала вредност со мали прирасти одејќи до некоја голема вредност и така пресметувајќи ја импедансата да се одреди екстремот. Оваа постапка е наречена **фреквенцијно скенирање (frequency scan)**.

Друг метод е да се испитува фазниот агол  $\varphi$  на  $|Z(\omega)| = Ze^{j\varphi}$ . Кога фазниот агол мине низ нула (импедансата стане реална величина), ова е можна точка на резонанција.

Досега реченото претпоставува дека импедансата е функција од фреквенцијата и се менува со промена на истата. Но во практиката, во енергетскиот систем фреквенциите се фиксирани и изнесуваат, основна  $\omega_1$  и вишите фреквенции  $h\omega_1$ ,  $h = 2, 3, \dots, h_{max}$ , а обично параметарот кој се менува е капацитетот  $C$ . На пример, тоа е при димензионирање на паралелно поставените кондензатори за компензација на реактивната моќност (подобрување на факторот на моќност). При изборот на  $C$  можна е извесна слобода на избор. Оние износи на  $C$  кои предизвикуваат екстремни вредности на  $|Z(\omega)|$  на една собирница која се анализира, треба да се знаат и избегнат. Сега позгодно е да се пресметува функцијата  $|Z(\omega)|$  како зависност од капацитетот  $C$ , односно да се изврши **капацитетно скенирање (capacitance scan)**.

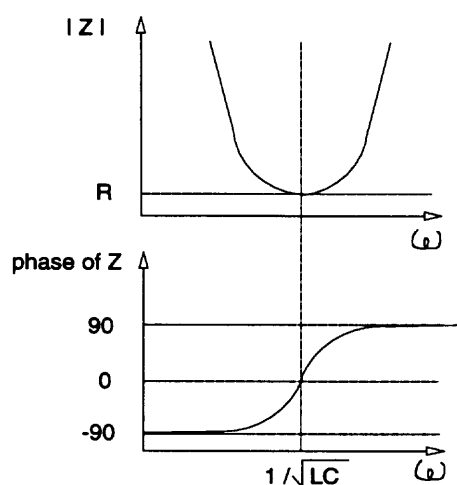
## Сериско резонантно $RLC$ коло

Сериското резонантно коло дадено е на сликата во табелата 1. За него важи:

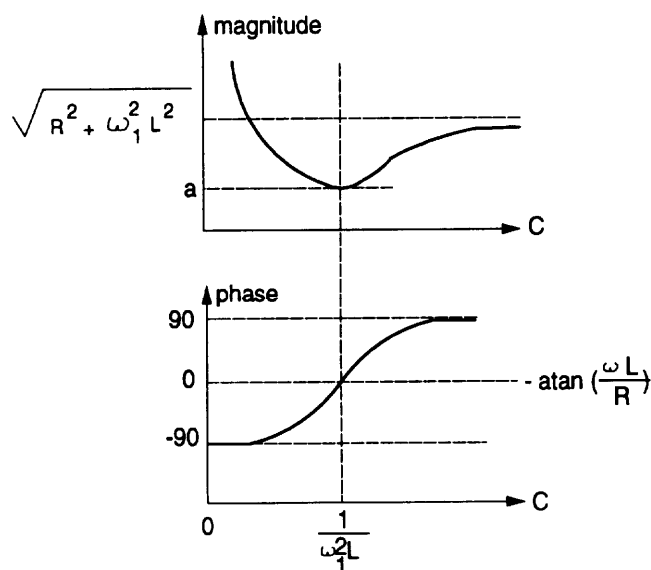
$$Z(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = Ze^{j\varphi} \quad \text{и одовде } |Z(\omega)| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \text{каде}$$

$$\varphi = \arctg \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R}. \quad \text{За } \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{односно } \omega_{rez} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \text{се добива}$$

$$|Z(\omega)| = Z_{\min} = R \quad \text{и } \varphi = \arctg 0 = 0.$$



Сл. 1. Модул и фаза на импеданса на сериско  $RLC$  коло зависно од фреквенцијата



Сл. 2. Модул и фаза на импеданса на сериско  $RLC$  коло зависно од капацитетот

Сликата 2 ја прикажува зависноста на модулот и фазата на импедансата од капацитетот  $C$  при фиксна фреквенција  $\omega = \omega_1$  (капацитивно скенирање). Во овој случај, подрачјето на менување на модулот и фазата не е исто со подрачјето како кај фреквенциското скенирање. Ова е затоа што фиксната фреквенција  $\omega_1$  не мора да е резонантната фреквенција и модулот и фазата за  $C \rightarrow 0$  и  $C \rightarrow \infty$  не соодветствуваат со модулот и фазата при  $\omega \rightarrow 0$  и  $\omega \rightarrow \infty$ . Асимптотите на слика 2 за  $|Z|$  и  $\varphi$  се добиваат ако се стави  $C \rightarrow \infty$ .

При фреквенции  $\omega > \omega_{rez}$  импедансата на сериското коло е индуктивна, а при фреквенции  $\omega < \omega_{rez}$  таа е капацитивна.

При константен приложен напон на сериското резонантно коло, со приближувањето кон резонантната фреквенција  $\omega_{rez}$ , расте струјата  $I$  во колото до најголемата вредност  $I = \frac{U}{R}$  одредена само со отпорот. Односот:

$$d = R\sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}};$$

се вика "придушвање" на сериското резонантно коло. Реципрочната вредност на придушвањето  $Q = \frac{1}{d} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$  се вика "добрина" на колото.

Со приближувањето кон резонантната фреквенција, напонот на поедините компоненти на сериското резонантно коло расте и постои опасност тие компоненти да се преоптоварат. Важат следните зависности:

$$U_L = j\omega L \frac{U}{Z} \quad \text{и} \quad U_C = \frac{1}{j\omega C} \frac{U}{Z}.$$

На овие равенки може да им се даде и друга форма, погодна за анализа за резонантната состојба:

$$\frac{U_L}{U} = \frac{\frac{\omega}{\omega_{rez}}}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{rez}} - \frac{\omega_{rez}}{\omega}\right)^2}} \quad \text{и} \quad \frac{U_C}{U} = \frac{\frac{\omega_{rez}}{\omega}}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{rez}} - \frac{\omega_{rez}}{\omega}\right)^2}}.$$

За  $\omega = \omega_{rez}$  важи  $\frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{1}{d} = Q$ , а ова значи дека единствено придушвањето  $d$  ги ограничува овие пораста на напоните. Бидејќи  $Q$  е доста поголемо од 1, напоните  $U_L$  и  $U_C$  се доста поголеми од  $U$ .

### Паралелно резонантно $RLC$ коло

Шемата на колото е прикажана во табелата 1. Зависностите на  $Z$  и  $\varphi$  од  $\omega$  дадено е на сликата 3, а зависноста од  $C$  за фиксна фреквенција  $\omega_1$ , дадена е на сликата 4. Забележуваме дека сега имаме максимум на  $Z$  и минување низ нула на  $\varphi$  при резонантната фреквенција при двата начини на скенирање.

За паралелното коло полесно се пресметува адмитансата  $Y$  а од неа и импедансата:

$$Z = \frac{1}{Y},$$

$$Y = \frac{1}{R} + j\omega C - j\frac{1}{\omega L} = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right).$$

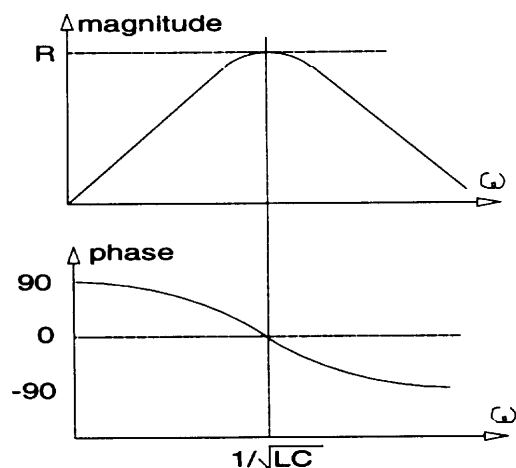
При резонантна фреквенција е  $\omega C = \frac{1}{\omega L}$  односно  $\omega_{rez} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Тогаш е

$Y = \frac{1}{R}$  е минимална, а  $Z = |Z| = \frac{1}{|Y|} = R$  е максимална. Ако е притоа  $R = 0$  и  $Z = 0$  и  $Y = \infty$ .

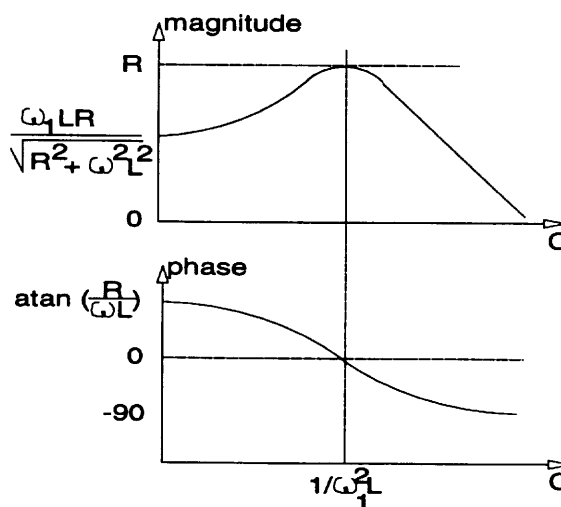
Ако низ паралелното резонантно коло тече една нарината струја (дефинирана од струен извор), тогаш при резонанција ќе порасне напонот



на колото. Сите елементи на колото ќе се најдат напонски (и струјно) преоптоварени.



Сл. 3. Модул и фаза на импеданса на паралелно  $RLC$  коло зависно од фреквенцијата



Сл. 4. Модул и фаза на импеданса на паралелно  $RLC$  коло зависно од капацитетот

И овде може да се дефинираат величините:

Придушување:  $d = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$  и добрина  $Q = \frac{1}{d}$ . (Забележи дека сега придушувањето се пресметува како реципрочна вредност во однос на формулата за сериско коло. Добрината е во праксата мал број, многу помал од 1).

Струите низ поедини компоненти на паралелното резонантно коло растат во близина на резонантната фреквенција:

$$I_L = \frac{1}{j\omega L} \frac{I}{Y} \quad \text{и} \quad I_C = j\omega C \frac{I}{Y}.$$

За  $\omega = \omega_{rez}$  важи  $I_C = I_L = \frac{I}{d}$  и бидејќи  $\frac{1}{d}$  е мало, струите низ индуктивитетот и капацитетот може знатно да ја надминат вкупната струја  $I$  и тие елементи на колото може да се оштетат.

Друг облик на овие зависимости е:

$$\frac{I_C}{I} = \frac{\frac{\omega}{\omega_{rez}}}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{rez}} - \frac{\omega_{rez}}{\omega}\right)^2}} \quad \text{и} \quad \frac{I_L}{I} = \frac{\frac{\omega_{rez}}{\omega}}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{rez}} - \frac{\omega_{rez}}{\omega}\right)^2}}.$$

### 3.11 Принципи за контрола на хармониците

Ова поглавје ги опишува некои од основните принципи за контрола на хармониците.

Основно, хармониците стануваат проблем ако:

- Изворот на хармониски струи е преголем;
- Патеката по која се движат хармониците е предолга, резултирајќи во високо напонско изобличување или телефонски и командни пречки;
- Одговорот на системот истакнува еден или повеќе хармоници.

Кога ќе се појави проблемот, основни опции за контрола на хармониците се:

- Редуцирање на хармониските струи предизвикани од оптоварувањето;
- Додавање на филтри за отстранување на хармониските струи надвор од системот или блокирање на струите да влезат во системот;
- Менување на фреквентниот одзив на системот со филтри, индуктивитети и кондензатори.

#### 3.11.1 Редуцирање на хармониските струи во оптоварувањата

Најчесто, многу малку може да се направи со постоечката опрема која е во погон, за да значајно се редуцира количината на хармоници што таа ги создава. Додека перевозбуден трансформатор може да се врати во нормален режим преку намалување на доведениот напон, лачните уреди и повеќето електронски конвертори се ограничени од своите производни карактеристики.

PWM погоните кои напојуваат еднонасочна кондензаторска собирница директно од напојниот наизменичен довод се едни од исклучоците од кажаново. Додавањето на линиски реактор (придушница) сервиски, значително ќе ги редуцира хармониците, а ќе создаде и корисна заштита од преодни појави.

Поврзувањето на трансформаторите (т. н. група на врзување) може да допринесе за намалување на хармониците во трифазните системи. Изместувањето на половината од 6-пулсните конвертори во оптоварувањето на постројката за 30 степени може да донесе корисно приближување до 12-пулсните оптоварувања со драматично редуцирање на петтиот и на седмиот хармоник. Трансформаторите во врска тријаголник (“делта” врска) можат да го блокираат текот на хармониците со нулти редослед (типично тројните). Намотките во врска ѕвезда и прекршена ѕвезда кои се заземјени кај трансформаторите можат исто така да ги одведат тројните хармоници надвор од водот. Една мерка на превенција е да се избегнува набавка на нова опрема која емитура големо количество хармонични струи, на пример, кога се набавуваат модерни економични светилки.

### 3.11.2 Филтрирање

Паралелните (шант) филтери работат со кусо врзување на хармониските струи, што е можно поблиску до изворот на изобличување. Ова ги држи струите подалеку од напојниот систем. Тоа е и најчесто користен начин на филтрирање, како од економски причини, така и поради тоа што се стреми да го одржи неизобличен напојниот напон но и да ја отстрани хармониската струја.

Друг метод е сериски филтер што ги блокира хармониските струи. Ова е паралелно нагодно коло што претставува висока импеданса на хармониската струја. Не се користи често оти е тешко да се изолира, а и напонот на оптоварувањето е доста изобличен. Применувано решение е да во неутралниот проводник на заземјеното свездиште се блокира текот на тројните хармоници, а сеуште да се задржи доброто заземјување за основната фреквенција.

Активните филтри работат со електронско уфрлање на хармоничната компонента од струјата во нелинеарниот товар. (Повеќе информации за филтрирање се дадени во делот 3.15).

### 3.11.3 Менување на фреквентниот одзив на системот

Неповолниот одзив на системот на хармоници може да се менува преку повеќе методи:

- Со додавање на паралелен (шант) филтер. Ова не само што ги одвојува проблематичните хармоници од системот, туку и комплетно го менува одзивот на системот, многу често, но не и секогаш, на подобро.
- Со додавање на реактор за разгодување на системот. Лошите резонанси обично се меѓу индуктивитетот на системот и кондензаторите за корекција на факторот на моќност. Реакторот мора да се додаде меѓу кондензаторот и системот. Еден од начините е едноставно, реакторот да се стави во серија со кондензаторот и ја помести резонансата на системот без да го нагодува кондензаторот за да создаде филтер (Во германската литература познато како “Verdrosselung” или придушвање).
- Со менување на големината на кондензаторот. Ова е еден од најевтините начини за сите видови на корисници.
- Со поместување на кондензаторот во точка од системот со различна импеданса на куса врска или со повисоки загуби. Ова не е толку применливо кај индустриските корисници каде кондензаторот не може да се помести доволно за да се почувствува разлика.
- Со отстранување на кондензаторот и едноставно прифаќање на повисоки загуби, понизок напон и пенали поради лош фактор на моќност. Ако е технички изводливо, ова често е најдоброто решение, од економска страна.

### 3.11.4 Кај електродистрибутивните напојувачи

Односот  $X/R$  кај дистрибутивните напојувачи е генерално низок. Според тоа, истакнувањето на хармониците при резонанса со

кондензаторски батерии на напојните доводи е обично благо. Но, може да биде и забележливо кога кондензаторската батерија се става под товар и може сеуште да предизвика неправилности кај опремата. Инженерите можат обично да ги стават батериите на напојните доводи каде што сакаат, без да се грижат за хармониците, па ако се појави проблем, решението се состои во поместување на батеријата или промена на големината на кондензаторот.

Многу проблеми со хармониците поради додавањето на батерии на напојните доводи се поради зголемувањето на тројните хармоници во неутралното коло на напојниот довод. За да се промени текот на хармониските струи на нултата компонента, се прават промени во неутралната врска на батериите поврзани во ѕвезда. Ако се сака да се блокира текот, неутралниот проводник се остава да “лебди” (не се заземјува).

Многу пати, проблемите со хармониците кај дистрибутивните напојни доводи постојат само при мало оптоварување. Напонот расте, што го предизвикува трансформаторот да создава повеќе хармоници. Останува помал товар да ја пригуши резонансата. Исклучувањето на кондензаторите во тој момент го решава проблемот.

Кога изобличените струи потекнуваат од дисперзирани извори, обично се настојува да се поставуваат филтери по дистрибутивниот напоен вод на неколку места. Со ова се скратува патеката на струјните хармоници со што се намалуваат телефонските пречки и хармоничните падови на напон долж водот. Исто така, поволно е да се стават филтри на крајот од напојниот вод. Тогаш веројатноста дека на други места напонското изобличување ќе ги надмине границите, е помала.

Неопходно е да се прават студии на хармониците кај секоја поголема кондензаторска батерија инсталирана во дистрибутивниот систем. Не треба да се потпираме на претпоставката дека постојат активни загуби и дека резонанцијата сама ќе се придуши. Ставањето на филтер во потстаничната батерија нема со сигурност да ги реши проблемите во напојниот довод, освен ако проблемот базира на резонансата на кондензаторската батерија во потстаницата.

### **3.11.5 Во електричните постројки кај крајните корисници**

Прво, се проверува дали може да се употреби различна големина на кондензатор. Понекогаш, има толку многу кондензатори поврзани со оптоварувањата, што е невозможно да се исконтролира вредноста на капацитетот. Сепак, со секционирани кондензаторски батерии кои се уклучуваат етапно и со автоматските контролери на факторот на моќност, можеен е изборот на контролна шема која ја избегнува конфигурацијата што создава проблеми.

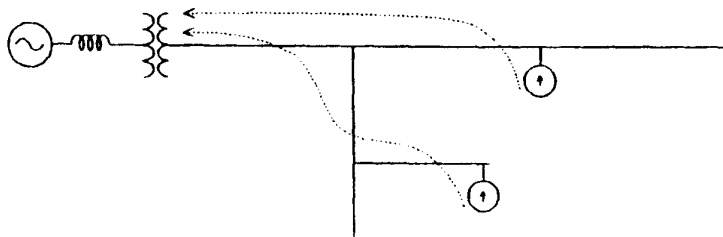
Инсталирањето на филтер во системите на крајните корисници е поатрактивно, практично и економски, отколку кај електродистрибутивните системи. Критериумите за инсталирање на филтер се лесно остварливи, а филтерската опрема може да се набави на пазарот.

Треба да се прават студии за сите кондензатори инсталирани во индустриските системи. Системите се генерално толку кратки, што

загубите во водовите се недоволни да ја пригушат резонансата, ако постои. Некои постројки се исклучок, бидејќи кондензаторите се инсталирани во близината на оптоварувањата и има доволно активна отпорност во водовите да заштити од проблеми. Освен тоа, некои оптоварувања значителни придонесуваат во пригушувањето. Меѓутоа, не смее да се смета на оваа поволност како на правило, се додека не се направи студија. Ако некој инсталира кондензатори за прв пат, треба да има на ум дека проблемите со резонансата се помалку лоши кога кондензаторите се поместени во погонската сала поблиску до моторите или кај управувачкиот центар на истите.

### 3.12 Лоцирање на изворите на хармоници

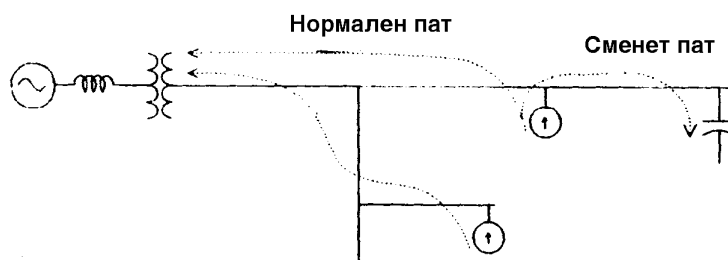
Кај напојните водови на радијалните дистрибутивни системи и енергетските постројки на индустриските системи, главната тенденција е, хармониските струи да течат од оптоварувањето кое ги создава, кон изворот на енергетскиот систем. Ова е илустрирано на Слика 3.24. Импедансата на енергетскиот систем е нормално најниската која “ја гледаат” хармониските струи. Според тоа, главниот дел од струјата тече кон изворот.



Сл.3.24. Проток на струјата на хармониците во радијален енергетски систем

Споменатава тенденција, може да се искористи за лоцирање на изворите на хармоници. Со користење на опрема за мониторинг на квалитетот на електричната енергија, способна да ја мери хармониската содржина на струјата, едноставно се мерат струите во секоја гранка, почнувајќи од почетокот на колото и следејќи ги хармониците до изворот.

Кондензаторите за корекција на факторот на моќност, можат да ја менуваат оваа шема на тек, барем за еден од хармониците. На пример, додавањето на кондензатор на претходното коло, како што е покажано на Слика 3.25, може да отклони голема количина на хармониски струи во тој дел од колото. Користењето на процедурата опишана погоре, може да предизвика следење на сменетата патека, што води кон кондензаторската батерија наместо кон изворот на хармоници. Поради тоа, генерално е потребно привремено да се исклучат сите кондензатори, за полесно да се лоцираат изворите на хармоници.



Сл.3.25. Кондензаторот за фактор на моќност може да го смени правецот на протокот на една од хармоничните компоненти во струјата

Обично е многу лесно да се направи разлика меѓу хармониските струи кои се поради актуелните извори и хармониските струи кои се посебно присутни поради резонансата што ја вклучува кондензаторската батерија. Резонантните струи имаат еден доминантен хармоник кој “јава” на врвот на основниот синусен бран. Ако се простудираат облиците на струјните бранови, претставени порано во текстов, не постои ниеден кој создава единечна хармониска фреквенција што се додава на основната. Тие имаат, на некој начин, произволни бранови облици, во зависност од феноменот на изобличувањето, но содржат неколку хармоници со значителни големини. Единечен, голем, значаен хармоник, скоро секогаш значи резонанса.

Овој факт може да се искористи да се одреди дали постојат услови за постоење на проблеми со резонанса во системи со кондензатори. Едноставно, се мери струјата во кондензаторите. Ако содржи голема количина на некој хармоник различен од основниот, може да се заклучи дека кондензаторот учествува во резонантното коло со енергетскиот систем. Секогаш, најпрво треба да се проверат кондензаторските струи, во секои инсталации каде постои сомнеж дека можат да се јават проблеми со хармониците.

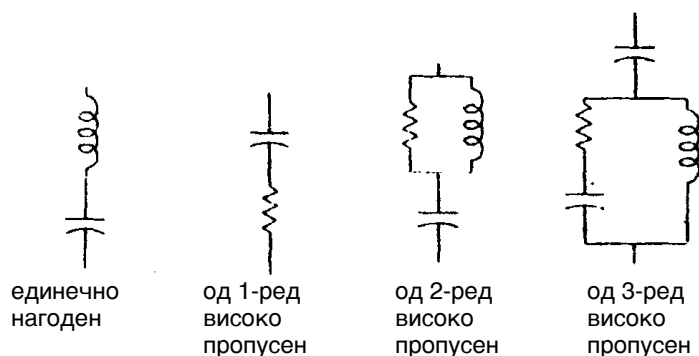
### 3.13 Уреди за филтрирање на хармониското изобличување

Постојат две основни класи на филтри:

1. Пасивни филтри;
2. Активни филтри.

#### 3.13.1 Пасивни филтри

Пасивните филтри се состојат од елементи со природа на индуктивитет, капацитет и активна отпорност. Релативно се поевтини, во споредба со останатите решенија за елиминирање на хармониското изобличување, но го имаат недостатокот од потенцијални, неповолни интеракции со енергетскиот систем. Се користат за да ги одведат хармониците вон мрежата или да го блокираат нивниот тек помеѓу деловите од системот, со нагонување на елементите да создадат резонанса на одбрана хармониска фреквенција. Сликата 3.26 покажува неколку типови на филтерски кола (сликата се однесува на колото само за една фаза).



Сл.3.26. Општа конфигурација на пасивен филтер

Најчест тип на пасивен филтер е единечно-нагоден “засек” (notch) филтер. Тоа е истовремено и најекономичен филтер и е доволен за примена. Пример за типичен 480 V-ен филтерска шема е прикажан на Слика 3.27. Овој филтер е сервиски нагоден да покажува ниска импеданса за одделна хармониска струја. Поврзан е паралелно со енергетскиот систем. Според тоа, хармониските струи се пренасочени од нивната нормална патека по водот кон филтерот. Овие филтри можат да прават корекција на факторот на моќност, покрај потиснувањето на хармониците.

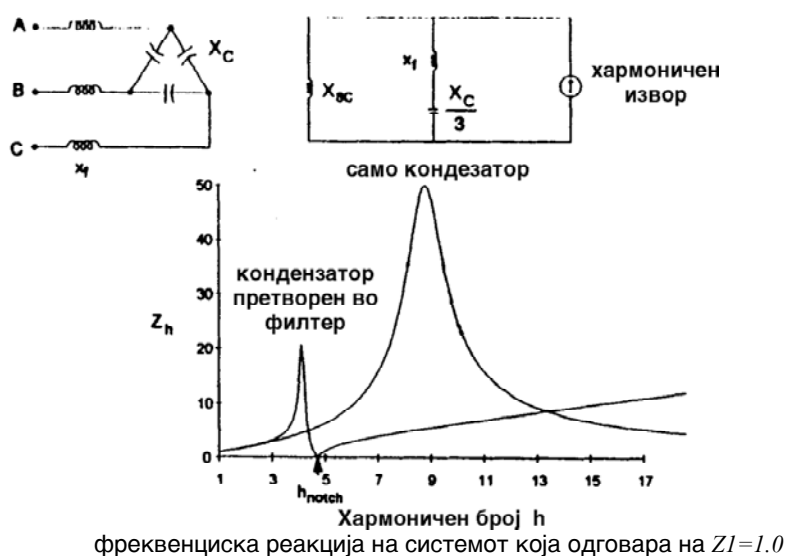
Сликата покажува кондензаторска батерија поврзана во триаголник, претворена во филтер со додавање на индуктивитет во серија. Во овој случај, нагодениот хармоник,  $h_{zasek}$ , е поврзан со реактансата на основната фреквенција преку:

$$h_{zasek} = \sqrt{\frac{X_c}{3X_f}}$$

... [ 3. 29]

(а) типична конфигурација на ниско-напонски филтер

(б) еквивалентно коло на систем со филтер

фреквенциска реакција на системот која одговара на  $ZI=1.0$ 

Сл.3.27. Создавање на петто-хармоничен нагоден филтер и неговиот ефект врз реакцијата на енергетскиот систем

Треба да се примети дека  $X_c = X_{cd}$  во случајов е реактансата на едната страна на триаголникот (при кондензаторска батерија поврзана во триаголник), а не е реактанса на еквивалентната гранка фаза-неутрала. (Ако го користевме линискиот напон и трифазната моќност на кондензаторот за пресметка на  $X_c$ , немаше да се дели со 3). Ако триаголникот на капацитети се еквивалентира со звезда, се добива точно шемата на 3 единични паралелни филтри во секоја фаза според сл. 3.26.

Еден важен спореден ефект од додавањето филтер е што тоа создава остра паралелна резонантна точка на фреквенцијата под фреквенцијата на засекот (Слика 3.27с). Оваа резонантна фреквенција мора да биде на сигурно растојание од било кој значаен хармоник. Филтрите обично се нагудуваат нешто пониско отколку што треба за хармониците, за да се создаде една безбедносна граница, а во случај на промена на параметрите на системот. Ако се нагодат точно како хармоникот, промените во капацитивноста или индуктивноста заради температурата или некој дефект, може да ја измести паралелната резонанса повисоко, токму на фреквенцијата на хармоникот. Сето ова, има за последица ситуација која е полоша и од таа без филтер, бидејќи резонансата, генерално е многу остра.

Од оваа причина, филтрите се додаваат во системот, почнувајќи со најнискиот хармоник кој создава проблеми. На пример, инсталирањето на филтер за седмиот хармоник, повлекува инсталирање на филтер и за петтиот хармоник. Новата паралелна резонанса со присуство само на филтер за седмиот хармоник, ќе биде многу блиска до петтиот, што општо земено, е катастрофално.

Конфигурацијата на филтерот од претходната слика не дозволува струи со нулта компонента, бидејќи кондензаторот е поврзан во триаголник. Тоа го прави во голема мерка неефективен за филтрирање на тројни хармоници. Спротивно на него, кондензаторите во дистрибутивните системи се поврзани во звезда. Ова дава можност за обезбедување на патека за тројните хармоници со нулта компонента, со едноставна промена на неутралната врска. Ставањето реактор во неутралниот проводник на кондензаторот е вообичаен начин да се присили батеријата да ги филтрира само хармониците со нулта компонента. Техникава се користи заради елиминирање на телефонските смеќавања. Реактор со отцеп се става во неутралниот проводник и отцепот се регулира да ги минимизира телефонските пречки, зависно од тоа кој хармоник прави проблем.

Пасивните филтри треба секогаш да се ставаат на собирницата каде  $X_{sc}$  може да се очекува да остане константен. Додека фреквенцијата на нагудувањето на филтерот ќе остане фиксирана, паралелната резонанса ќе се менува со промената на импедансата на системот. На пример, паралелната резонантна фреквенција за погон само со резервното генерирање (резервен локален генератор), веројатно ќе биде многу пониска отколку кога е поврзана со мрежата. Така, филтрите се често

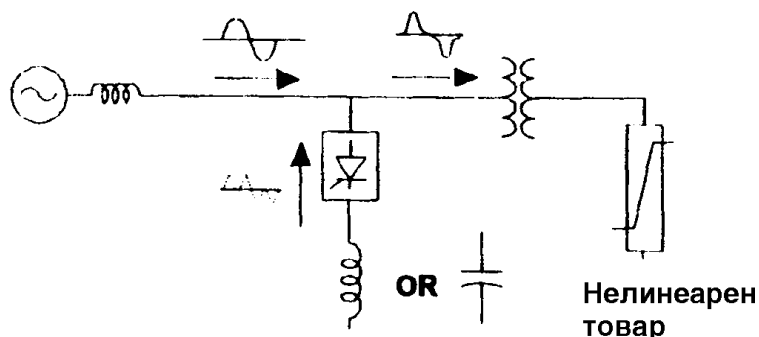


исклучени при резервно генерирање. (Ова правило важи за претпријатија каде има резервно генерирање).

Филтрите треба да се проектираат така, што притоа се има на ум капацитетот на собирницата. Проектантите често се во искушение да го преоектираат филтерот да биде во состојба да ја одведе целата струја на вишите хармоници кои ги создава товарот. Но, ако има макар и мала позадинско изобличување на напонот и собирницата каде филтерот се поставува е многу крута (има голема струја на куса врска), можно е филтерот да се најде струјно преоптоварен (всушност филтерот е додатно оптоварен заради струи кои доаѓаат од напојниот систем).

### 3.13.2 Активни филтри

Активните филтри се релативно нови типови на уреди за елиминирање на хармоници. Базирани се на софистицирана енергетска електроника и се многу поскапи од пасивните филтри. Сепак, тие имаат суштествена предност што не резонираат со системот. Можат да се користат во многу тешки услови каде пасивните филтри не можат да работат ефикасно поради опасноста од паралелна резонанса. Тие исто така се соочуваат со повеќе од еден хармоник во исто време и се борат со останатите проблеми што го засегаат квалитетот на електричната енергија, како на пример фликерите. Посебно се корисни за многумоќни нелинеарни оптоварувања, напојувани од релативно слаби точки на енергетскиот систем. Такви се на пример електролачни печки за наизменична струја.



Слика 3.28. Примена на активен филтер за нелинеарен товар

Основната идеја е да се надополни делот од синусниот бран што недостига во струјата во нелинеарното оптоварување. Сликата 3.28 го илустрира овој концепт. Електронското управување ги следи напонот и/или струјата, местейќи ја енергетската електроника да ја следи струјата на оптоварувањето или напонот и да ја принуди да биде синусоидална. Како што се гледа, во игра се два основни приоди: еден што користи индуктивитет кој складира струја за инјектирање во системот во соодветен момент и друг кој содржи кондензатор. Значи, мора да постои и резервоар за дополнителна енергија, содржана во  $L$  или  $C$ . Има изведби со енергија акумулирана во замајни маси. Според тоа, додека струјата на

оптоварувањето е изобличена до големина определена од нелинеарниот товар, струјата што ја “гледа” системот е многу повеќе синусоидална.

Активните филтри можат истовремено да го корегираат и факторот на моќност и хармониците.

### 3.14 Процедура за проучување на хармониците

Следува идеалната процедура за анализирање на хармониците во енергетскиот систем:

- Се одредуваат целите на студијата. На пример, цел е да се идентификува причината која што го создава постоечкиот проблем, ако таков постои и да се реши истиот. Друга цел може да биде на пример, анализа дали може погонот да се прошири, со додавање на нова производна опрема која содржи регулиран ел. мот. погон и/или додатни кондензатори;
- Се прави почетна компјутерска симулација, базирана на информациите со кои се располага. Мерењата се скапи во поглед на време, опрема и можен прекин на операциите на постројката. Затоа е подобро да се има идеја што да се бара и каде, пред да се почне;
- Се прават мерења на постоечката состојба со хармониците, со карактеризирање на изворите на хармоници и изобличувањето на системската собирница;
- Се калибрира компјутерскиот модел со користење на мерењата;
- Се проучуваат новите услови во колото или постоечкиот проблем;
- Се развиваат решенија (филтер, итн.) и се откриваат можните интеракции во системот. Се анализира осетливоста на резултатот варирајќи некои важни параметри.
- По инсталирањето на предложените решенија, се прави мерење (мониторинг), за да се верифицира дали системот работи правилно.

Оваа процедура бара пристап до компјутерски алатки за анализа и адекватна мерна опрема.

Мора да се признае, не секогаш е можно да се изведе секој од наведените чекори на задоволително ниво. Најчесто прескокнатата фаза е едната или двете мерни фази, поради трошоците на времето и патувањето на инженерот и на употребата на опремата. Искусен специјалист може е во состојба да го реши проблемот без мерења, но строго се препорачува да се изведат барем иницијалните мерења, ако е можно, бидејќи се присутни многу скриени изненадувања.

### 3.15 Симетрични компоненти

Инженерите во енергетиката традиционално ги користат симетричните компоненти како помош во разбирањето на однесувањето на трифазните системи. Така, трифазниот систем се трансформира во три еднофазни системи кои се многу поедноставни за анализа.

Методот овозможува било кој систем на неурамнотежени фазни струи (или напони), да се трансформира во три урамнотежени системи, директен, инверзен и нулти систем. Директниот систем содржи три синусоиди изместени помеѓу себе за 120 степени, со нормален, А-В-С

фазен редослед. Синусоидите на инверзниот систем се исто така меѓусебно изместени за по 120 степени, но имаат спротивен редослед на фазите (А-С-В). Синусоидите на нултатиот систем се во фаза меѓу себе. (Подетално за симетричните компоненти ќе се дознае на вежби)

Во перфектно урамнотежените<sup>5</sup> системи:

- ♦ Хармониците од ред  $h = 1, 7, 13, \dots$  се со чисто директен редослед. Редот се добива од  $3n + 1; n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;
- ♦ Хармониците од ред  $h = 5, 11, 17, \dots$  се со чисто инверзен редослед. Редот се добива од  $3n - 1; n = 1, 2, 3, \dots$ ;
- ♦ Тројните хармоници ( $h = 3, 9, 15, \dots$ ) се со чисто нулти редослед. Редот се добива од  $3n; n = 1, 2, 3, \dots$ .

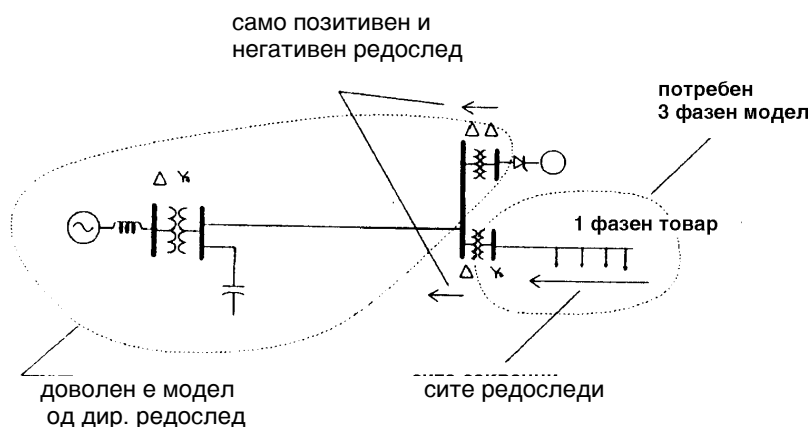
Доказот за горното тврдење може да се направи на сосема аналоген начин како што тоа се направи за нултиот систем од трети ред во поглавјето 3.6.

Во случаите кога системот е во рамнотежа, термините *тројни хармоници* и *нулти редослед* се синонимни, но само под наведениот услов. Кога оваа состојба е нарушена кој и да е хармоник може да биде делумно составен од кој и да е редослед.

Хармониците од директниот редослед се однесуваат во системот на вообичаен начин. Пресметката на струите и падовите на напон, било рачно или преку програми се обавува со користење импедансите од директниот систем. Треба да се внимава на следното:

Кога во трансформаторот постои врска во триаголник, било каде во серија со изворот на хармоници и енергетскиот систем, доволна е само еквивалентната шема на директниот редослед за да се определи одзивот на системот. Хармониците на нултата компонента се блокирани. Тоа се гледа на сл. 3.29, каде се гледа кој систем каде се применува.

Обете, и директната и инверзната еквивалентна шема на системот имаат ист одговор на хармониците. Може да се користи ист модел на колото за двете. Ако во мерењата се појавуваат тројните хармоници (ќе се појават при неуррамнотезени извори), нема да бидат од нулти редослед и ќе можат да се анализираат со истиот модел.



Слика 3.29. Влијание на трансформаторската врска при моделирањето при анализа на хармоничниот тек во мрежите.

<sup>5</sup> системот е урамнотежен ако има исти импеданси во секоја фаза и во секоја фаза се случуваат исти процеси само временски изместени за 120 степени

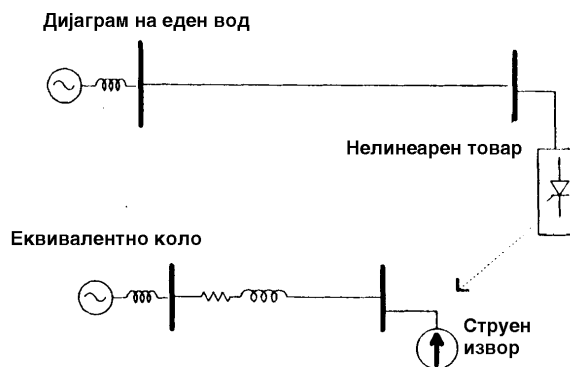
Техниката на симетрични компоненти ја губи добрата страна кога треба да се анализира четириводен дистрибутивен напојувач, со бројни еднофазни оптоварувања. Треба да се анализираат еквивалентни шеми за директен и нулти систем. Не е практично рачно анализирање на системот, и повеќе компјутерски програми способни за точно моделирање на овие системи едноставно ги поставуваат 3-фазни поврзани равенки и ги решаваат.

Како заклучок, многу хармонични случаи можат да се анализираат со примена на познатите техники на симетрични компоненти. Во случај на трифазните индустриски товари, скоро сите товари можат да се анализираат со примена на импедансен модел од директен редослед. Најзначајни исклучоци се хармоници од еднофазните товари на дистрибутивните напојувачки кола во индустриските и комерцијалните згради.

### 3.16 Моделирање на хармониски извори

Повеќето анализи на хармониците се прават со користење на стационарен режим и техники на решавање на линеарно коло. Хармониските извори, кои се нелинеарни елементи, генерално се земаат дека се инјектирачки извори во линеарните модели на мрежи.

За повеќето студии на тек на хармоници, погодно е да се сметаат хармониските извори како едноставни извори на хармониски струи. Ова е номинален случај за уредите на енергетскиот систем кога напонската изобличеност во сервисната собирница е релативно ниска, помала од 5%. Ова е илустрирано на слика 3.30. каде електронскиот конвертор е заменет со извор на струја во еквивалентно коло.



Сл.3.30. Претстава на нелинеарен товар со хармоничен струен извор за анализа

Вредностите на инјектираните струи треба да се определуваат со мерење. Во отсуство на тоа и на објавени податоци, може да се претпостави дека хармонискиот состав е инверзно пропорционален на хармонискиот број. Така, струјата на петтиот хармоник е една петтина или 20% од основната, итн. Ова е изведено од Фуриеровиот ред за квадратен бран, што е во основата на многу нелинеарни уреди. Сепак, не се применува доволно добро кај PWM погоните и SMPS напојувачата, кои имаат многу повисока хармониска содржина. Табелата 3.4 ги покажува типичните вредности потребни за анализи, за неколку типови на уреди.

**ТАБЕЛА 3.4 Типично хармониско изобличување за поважните уреди, (во %)**

Хармоник	6-пулсен ASD	PWM погон	Лачно осветление	SMP напојување
1	100	100	100	100
3			20*	70
5	18	90	7	40
7	12	80	3	15
9			2,4*	7
11	6	75	1,8	5
13	4	70	0,8	3

\*) За еднофазно или трифазно небалансирано моделирање, инаку тројните се усвојуваат нула.

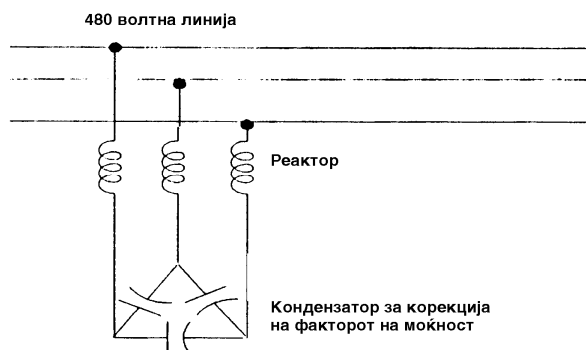
Кога системот е блиску до резонанса, едноставен модел на струен извор ќе даде извонредно високо предвидување за напонското изобличување. Моделот се обидува да внесе константна струја во висока импеданса, што не е валидна презентација на реалноста. Често, ова нема последици, затоа што најважната работа пред се е да се знае дека системот не може успешно да се оперира во резонанса, што е видливо од едноставниот модел. Потоа, кога резонансата ќе биде отстранета со, на пример, додавање на филтер, моделот ќе даде реален одговор. Сепак, за моделирањето, студентите ќе учат во понатаошниот тек на студиите.

### 3.17 Проект на хармониски филтер<sup>6</sup>

Проектирањето на филтер за хармоници е претставено преку пример, илустриран со Слика 3.32. Филтерот се предвидува за петтиот хармоник. Тој е за номинален напон 480 V и е од типот нагоден на една фреквенција.

Филтерот се нагудува нешто малку под хармониската фреквенција за која е наменет. Овој метод дозволува толеранции во филтерските компоненти и го штити филтерот од состојба во која тој може да се однесува како директна куса врска за штетната хармониска струја (во тој случај струјно би се преоптоварил). Ова исто така му обезбедува на филтерот вршење на својата функција, со редуцирање на оптоварувањето на поедините компоненти. Притоа, се минимизира можноста од опасна хармониска резонанса ако системските параметри се променат и да предизвикаат покачување на нарегулираната фреквенција.

<sup>6</sup> И овде се работи за пример земен од американска литература, што се одразува на користење на основна фреквенција 60 Hz и соодветни номинални напони. На пример во пресметките е  $\omega = 2\pi f = 377 \text{ rad}^{-1}$  (наместо  $\omega = 314$  при  $f = 50 \text{ Hz}$ )



Сл.3.32: Пример за ниско-напонска конфигурација на филтер.  
(Кондензаторската батерија може да е одпорано присутна во погонот, а со додавање на соодветен индуктивитет, се добива нагоден филтер).

Постапката е следната:

- Најпрвин се усвојува еднонагодлив паралелен (шант) филтер и се поставува за најниската генерирана фреквенција;
- Се определува нивото на изобличување на напонот на нисконапонската собирница (преку мерење на вишите хармоници на напонот на собирницата каде се предвивува филтерот);
- Се менуваат елементите на филтерот според наведените толеранции и се проверува ефективностa на истиот;
- Се проверува карактеристиката на фреквентниот одзив, за да се утврди дали новокреираната паралелна резонанса не е близу до некоја хармониска фреквенција;
- Ако е потребно, се согледува потребата од неколку филтри, како што се петтиот и седмиот или третиот, петтиот и седмиот.

Табелата 3.5. ги прикажува резултатите од процедурата за проект на филтерот со употребата на компјутерски програм за табеларни пресметки \*на пример, Excel. Методите кои се користени овде се:

Актуелната моќност на компензација на основната фреквенција добиена од дератираниот кондензатор (батерија) изнесува:  
(Евентуално кондензаторот се променува во однос на неговата затекната големина, се дератира, намалува, или пак актуелниот напон е различен од номиналниот)

$$S_{c,act} = S_{c,nom} \left( \frac{U_{act}}{U_{nom}} \right)^2 \quad (3.30)$$

Во овој случај, номиналниот и актуелниот напон се исти, така што актуелната моќност на кондензаторот е номиналната моќност, 500 kVar. Струјата на основната (фундаменталната) фреквенција за кондензаторот-батеријата се добива како:

$$I_{FLcap} = \frac{S_{c,act}}{\sqrt{3}U_{act}} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 0,480} = 601,4 \text{ A.} \quad (3.31)$$

Еквивалентна еднофазна импеданса на кондензаторот - батеријата се пресметува како (се посматра еквивалентна врска во ѕвезда):

$$X_{cy} = \frac{U_{nom}^2}{S_{c,nom}} = \frac{0,480^2}{0,5} = 0,4608\Omega \quad (3.32)$$

Импедансата на филтерскиот реактор (индуктивитет) се добива како (наместо 5 за  $n$ , се усвојува пониска вредност 4,7):

$$X_R = \frac{X_{cy}}{n^2} = \frac{0,4608}{4,7^2} = 0,02086\Omega \quad (3.33)$$

Вклучувајќи го филтерскиот реактор се зголемува фундаменталната струја до вредност:

$$I_{FLfilter} = \frac{U_{nom}}{\sqrt{3}(X_C + X_R)} = \frac{0.480}{\sqrt{3}(-0.4608 + 0.0209)} = 629.9 \text{ A} \quad (3.34)$$

Поради фактот што филтерот влече повеќе струја на основниот хармоник отколку кондензаторот кога е сам, добиената реактивна моќност за компензација е поголема од номиналната моќност на кондензаторот и се одредува со равенката

$$S_{c,supplied} = \sqrt{3}U_{nom} I_{FLfilter} = \sqrt{3} \times 480 \times 629,9 = 524 \text{ kVA} \quad (3.35)$$

Номиналните податоци за кондензаторот треба да се споредат со неговите стандардни граници на оптоварување како што е прикажано на долниот дел од табелата 3.5. Спецификациите за филтерскиот реактор треба да ги вклучат и вишите хармоници и основниот хармоник на струјата. Струјата на вишите хармоници треба да се одреди претпоставувајќи дека е присутна некоја реална вредност на позадинска изобличеност на напонот од другите извори. Во овој случај, изобличеноста на дистрибутивниот напон е усвоена 1.0 процент.

Карактеристики на нагоденост на филтерот се опишани со факторот на доброта  $Q$ . Факторот  $Q$  претставува мерка на острината на нагоденоста и за отпорот  $R$  на серискиот филтер и се одредува со равенката 3.36:

$$Q = \frac{nX_L}{R} \quad (3.36)$$

каде што:

$R$  = сериски отпор на филтерските елементи

$n$  = регулиран хармоник

$X_L$  = реактанса на филтерскиот реактор при фундаментална фреквенција

Типично, вредноста на  $R$  се состои само од отпорот на реакторот. Ова обично резултира во многу голема вредност на  $Q$  и многу остро дејство на филтерот. Ова е нормално задоволително за типични еднофилтерни

апликации и резултира во филтер кој се ракува економично (мали енергетски загуби). Понекогаш, пожелно е да се воведат намерни загуби за да се пригуши одговорот на системот. Отпорникот обично се додава паралелно на реакторот, за да се создаде високо-пропусен филтер. Во овој случај,  $Q$  се одредува со инверзија на равенката 3.36, така да големите броеви го одразуваат остро нагодување. Високо-пропусните филтри обично се користат само на 11-те и 13-те хармоници и повисоко. Обично не е економично да се работи со таков филтер на 5-от и 7-от хармоник, поради загубите и димензиите на отпорникот.

Реакторите кои се употребени за поголеми филтри се обично изградени со воздушно јадро, кое дава линеарни карактеристики во однос на фреквенцијата и струјата. Реакторите за помалите филтри и филтрите кои мораат да се постават во ограничен простор или блиску до челични структури се изградени со челично јадро. Обично,  $\pm 5\%$  толеранција во реактансата е прифатлива во индустриски примени. Односот  $X/R$  за 60 Hz, е обично помеѓу 50 и 150. Може да се употреби сериски отпорник за да го намали овој однос, ако се бара, да произведе филтер со повеќе пригушување. Реакторот треба да биде со такви номинални параметри, за да издржи краток спој помеѓу реакторот и кондензаторот. Проектираниот  $Q$  за високо-пропусната конфигурација може да биде 1 или 2 за да се добие благо наклонета карактеристика над нагодената фреквенција.

Филтрите за многу висока моќност, за трифазните примени како што се статичките системи за компензација (Static Var Systems), скоро секогаш вклучуваат 5-ти и 7-ми хармоници, бидејќи овие се најголемите хармоници произведени од 6-импулсниот мост. Повремено, ова предизвикува системска резонанса блиску до 3-от хармоник што може да бара третохармоничен филтер.

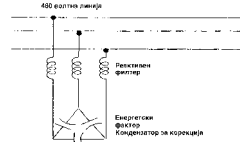
Никој не би помислил дека третиот хармоник би бил проблем во трифазниот мост, но неурамнотеженостите во работата на мостот и во системските параметри создаваат мали количества на некарактеристични хармоници. Ако системот се стреми кон резонанција на овие хармоници, филтрите треба да се употребат.



ТАБЕЛА 3.5 Пример за проект на хармоничен филтер

Пресметка на ниско напонски филтер

ИНФОРМАЦИИ ЗА СИСТЕМОТ :

Спецификација за филтерот:	5 тти	Фреквенција на системот	60 Hz
Кондензатор батерија:	500 kvar	Кондензатор за напон	480 V
Податок за струјата на батеријата :	601 A		60 Hz
Номинален напон на собирница:	480 V	Моќност на конд. бат.	500 kvar
Струја на кондензатор (вистинска):	601,4 Amps	Вкупно харм. оптеретување	500 kVA
нагонување на харм.:	4.7 th	нагонување на фреквенција	282 Hz=4,7*60
Импеданса на конденз.) (еквивалентна на ѕвезда):	0,4608 Ω`	Вредност на капацитетот (еквивалентна на ѕвезда):	5756,5 uF <sup>7</sup>
Импеданса на реактор:	0,0209 Ω	Ном.вред. на реактор:	0,0553 mH
Струја низ филтерот за полно оптеретување (вистинска):	629,9 A	Обезбедена компензација:	524 kVAr
Струја низ филтерот за полно оптеретување (номинална):	629,9 A		
Подат. за трансформатор:	1500 kVA	Корисничка страна $U_h$ :	1,00% THD
(Номинална моќ и импед. на к.в.)	6,00%	(Извор на хармоничен напон)	
Оптов. со струјни харм <sup>8</sup> : 30,00% Fund		Товар на струјни харм.:	180,4 A <sup>9</sup>
дистрибутивна харм. струја: <sup>10</sup>	47,7 Amps	Макс.вкупна.харм.струја:	228,1 A <sup>11</sup>
ПРЕСМЕТКА НА КОНДЕНЗАТОР:			
Еф. вред. на струја на филтер:	669,9 Amps <sup>12</sup>	Основен напон на капацитетот:	502,8 V <sup>13</sup>
Напонски харм. на капацитет <sup>14</sup>	36,4 V	Макс. напон (тем. вр.):	539,2 V <sup>15</sup>
ефект. вр. на напон на конденз:	504,1 V <sup>16</sup>	Макс. струја (тем. вр.):	858,0 Amps
ГРАНИЧНА ВР. НА КОНДЕНЗАТОРОТ: (IEEE Std 18-1980)		КОНФИГУРАЦИЈА НА ФИЛТЕРОТ:	
(112% за темената вр. на напонот од: (504,1+36,4)/480=1,12)			
Напон, темена вр.	Граница	добиено	
Струја:	120%	112%	
Kvar:	180%	111%	
RMS напон:	135%	117%	
	110%	105%	
СПЕЦИФИКАЦИИ НА ДИЗАЈНИРАН ФИЛТЕРСКИОТ РЕАКТОР: (види следната страница)			

$$^7 C = \frac{1}{\omega X_c}$$

<sup>8</sup> Толку изнесува струјата од 5-ти хармоник која се создава во погонот

<sup>9</sup> =601x0,3 бидејќи има 30% струи на 5-тиот виш хармоник, напр. добиено со мерење

<sup>10</sup> Толку изнесува струјата од 5-ти хармоник која доаѓа во филтерот од дистрибуцијата, бид. од таму се добива веќе изобличен напон

<sup>11</sup> =180,4+47,7

$$^{12} = \sqrt{630^2 + 228^2}$$

$$^{13} = I X_c \sqrt{3} = 629,9 \times 0,4608 \times 1,73$$

$$^{14} I_5 X_{c5} \sqrt{3} = 228,1 \frac{0,4608}{5} 1,73 = 36,4V$$

$$^{15} = 502,8 + 36,4$$

$$^{16} = \sqrt{480^2 + 36,4^2}$$

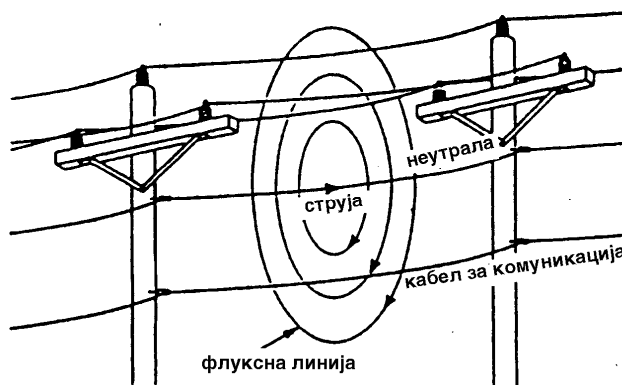
Реакторска импеданса:	0,0209 $\Omega$	Индуктивност на реакторот:	0,0553 mH
Осн. хармоник на стр. :	629,9 Amps	Хармонична струја:	228,1 Amps

### 3.20. Телекомуникациски пречки

Хармоничните струи кои течат низ дистрибутивниот систем, или во постројките на крајните корисници можат да создадат пречки во комуникациските кола кои ги делат истите патишта. (физички се близу) Напоните индуцирани во паралелните проводници од вообичаените хармонични струи, често паѓаат во фреквентно подрачје на нормалниот говорен опсег на комуникацијата. Хармониците помеѓу 540 Hz (9-ти хармоник<sup>17</sup>) и 1200 Hz ( $h=20$ ) се посебно смеќавачки. Индуцираниот напон по ампер од струјата се зголемува со фреквенцијата. Тројните хармоници (3-от, 9-от, 15-от) се проблематични посебно во четирипроводните системи бидејќи тие се во фаза во сите проводници од трифазното коло, и според тоа се додаваат директно во неутралниот проводник, кој најмногу е изложен кон комуникациските кола.

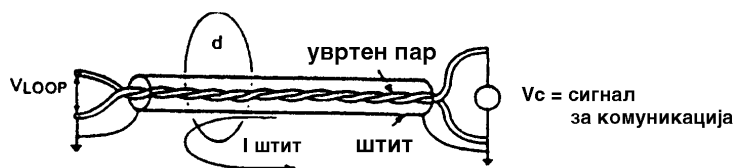
Хармоничните струи во енергетскиот систем се сврзуваат во комуникациските кола или со индукција или со директно спроведување. Слика 3.33 илустрира влијание од неутралата на надземниот дистрибутивен вод по пат на индукција. Ова беше тежок проблем во времето на телефонските кола со отворени жици. Сега со употребата на заштитени проводници со усукан пар жици за телефонските кола, овој начин на врска не е толку важен. Директното индуктивно врзување е еднакво во двата спроводници, и резултира со нулти индуциран напон во јамката формирана од проводниците.

Индуктивното сврзување може да биде проблем, ако високофреквентните струи се индуцирани во штитот кој ги опкружува телефонските проводници. Струјата која тече во штитот предизвикува пад на напон  $IR$  (сл.3.34), што резултира во можна разлика на потенцијал на заземјените точки во краевите на телефонскиот кабел.

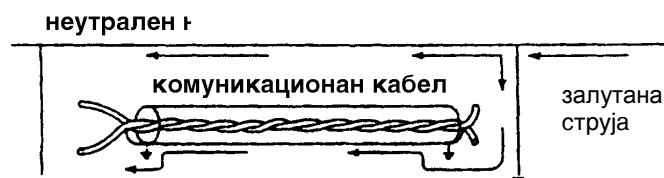


<sup>17</sup> се мисли на системот 60Hz

### Сл.3.33. Индуктивно сврзување од енергетски струен систем со телефонското коло



### Сл.3.34. IR пад на напон во каблов штит што резултира во можни разлики во точките на заземјувањето на краевите на кабелот



### Сл.3.35. Проводна врска низ општ заземјувачки пат

Струите во оклопот можат да бидат предизвикани и од директно водење. Како што е илустрирано на сл.3.35 штитот е во паралела со заземјувачкиот пат на енергетскиот систем. Ако локалните заземјувачки проводници се такви што релативна голема струја тече низ оклопот, големиот пад на напон IR во оклопот, ќе предизвика можна потенцијална разлика во заземјувачките точки на краевите на телефонскиот кабел.

## 3.21. Компјутерски средства за анализа на хармониците

Од претходната дискусија ја добивме идејата за типовите на активности кои мора да бидат изведени за спроведување на хармоничната анализа на енергетските системи. За сите, освен за наједноставните кола, потребен е усовршен компјутерски програм.

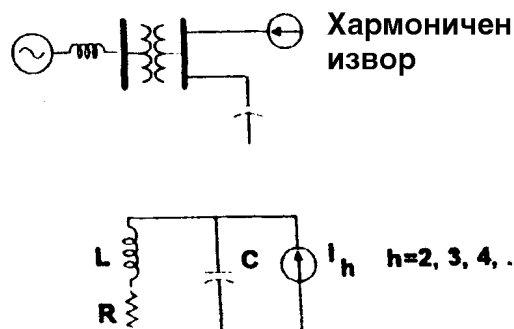
Прво, треба да се каже дека едно едноставно коло се појавува често во мали индустриски системи и можно е да се обработи со рачни калкулации (сл.3.36). Тоа е коло со една собирница со еден кондензатор. Две работи можат да се сторат релативно лесно:

1. Да се одреди резонантната фреквенција. Ако таа е блиску до можниот опасен хармоник, или мора да се смени кондензаторот или да се проектира филтер.
2. Да се направи проценка на напонското изобличување поради струјата,  $I_h$ . Напонот  $U_h$  е даден со равенката:

$$U_h = \left( \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} \right) I_h \quad (3.37)$$

$$h = 2, 3, \dots$$

$$\omega = 2\pi f_1 h$$



Сл.3.36. Едноставно коло кое што може рачно да се анализира

Ако резонантната фреквенција не е блиску до значителен хармоник, и проценетата напонска дисторзија е ниска, апликацијата сигурно ќе биде успешна.

За жал, не сите практични случаи можат да се претстават со толку едноставно коло. Всушност, додавањето на само една спојница со кондензатор на едноставното коло како на сл.3.36. го прави проблемот вистински предизвик дури и за најдобрите аналитичари. Како и да е, компјутерот може да ја заврши истата работа за многу кусо време.

За да се употребат компјутерските средства кои се на располагање, аналитичарот мора да му ја опише на програмот конфигурацијата на колото, товарот и изворите. Мора да се соберат следниве податоци:

- Импедансата на трансформаторот и на водот
- Трансформаторските поврзувања
- Вредности и локации (многу важно!) на кондензаторот
- Хармоничен спектар од нелинеарните товари
- Напони на енергетскиот извор

Овие вредности влегуваат во програмата што ги прилагодува импедансите за фреквенциите на хармониците и го пресметува текот на хармониските струи низ системот.

### 3.21.1. Можности на програмите за хармонична анализа

Прифатлив компјутерски софтвер за хармонична анализа на енергетскиот систем треба да ги има следниве карактеристики:

- Треба да е способен за работа со големи мрежи со најмалку неколку стотини јазли;
- Треба да е способен за работа со трифазни модели со произволна структура. Не сите кола посебно оние на дистрибутивните напојувачи се подложни на точно решение, со урамнотежени модели на директниот систем.

- Треба да е способен за моделирање на системи од директен редослед. Кога нема да има нулти хармоници, нема смисла да се губат компјутерските ресурси за цел трифазен модел.
- Треба да може да ја анализира импедансата на системот при разни фреквенции со посматрање на мали фреквентни интервали (на пример 10 Hz), за да ги развие карактеристиките на системскиот фреквентен одговор неопходен за идентификација на резонансите. (Ова се вика фреквенциско скенирање)
- Способен за изведување на симултано решавање на бројни хармонични извори, за да се процени актуелната струјна и напонската дисторзија.
- Треба да има вградени модели за вообичаените хармонични извори.
- Треба да ги дозволи и струјните и напонските модели на хармоничните извори.
- Треба да може автоматски да ги прилагоди фазните агли на изворите базирани на фазните агли на фундаменталната фреквенција.
- Способен да ја моделира која било трансформаторска врска.
- Да може да ги изложи резултатите на начин сфатлив за корисникот.

### 3. 22. Норми за вишите хармоници

При нормирањето постои еден општ принцип кој вели дека интересите на двата субјекта а тоа се испорачателот и корисникот на електричната енергија треба да се усогласат, почитувајќи притоа економски и технички ограничувања. За да се постигне ова, можни се следните зафати: 1. Ограничување на емисијата на вишите хармоиници (струите на потрошувачите); 2. Намалување на врската меѓу уредите кои емитираат пречки и уредите кои се попречувани од пречките; 3. Зголемување на отпорноста кон пречки на уредите.

#### Емисија на виши хармоници во мрежата од страна на потрошувачите

Ова е обврска на корисниците на електрична енергија да се усогласат со овие барања. Секако, ги засега и производителите на опрема. Нормите (стандардите) постојано се во развој и промени. Во последно време се повеќе се напуштаат националните норми, а се преминува кон европските. Такви се EN61000 дел 3-2 и меѓународниот IEC 1000 - 3 - 4. Иако овие норми сеуште се предлог, сепак ќе прикажеме еден мал дел од нив. Има едни правила за апарати кои земаат струја до 16 ампера, а други за појаките потрошувачи. За апаратите кои земаат струја поголема од 16

ампера, сите случаи на оценка се поделени на три степени, прв, втор и трет.

Степенот 1 ги опфаќа апаратите кај кои моќноста на куса врска  $S_k''$  во местото на заедничко приклучување на потрошувачот (point of common coupling) е најмалку 33 пати поголемо од моќноста на апаратот кој се анализира. За степенот 1 дозволените емисии на струјни виши хармоници дадени се во табелата 1.

Табела 1: Граници за емитирање на виши хармоници според IEC 1000 - 3 -4, степен 1.,

$$\frac{S_k''}{S_n} > 33, I_1 > 16 \text{ A.}$$

Ред на харм.	$I_{h\max} / I_1$ (%)	Ред на харм.	$I_{h\max} / I_1$ (%)
3	21,6	21	<0,6
5	10,7	23	0,9
9	7,2	25	0,8
11	3,1	27	$\leq 0,6$
13	2,0	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	$\geq 33$	$\leq 0,6$
		Парни	$\leq 8/h$ или $\leq 0,6$

Табелата 1 дадена е само како пример. За степените 2 и 3 кои важат за други дефинирани услови на  $\frac{S_k''}{S_n}$  и типот на потрошувачите, упатуваме на спомнатиот стандард.

### Ниво на подносливост

Под овој поим го подразбираме нивото на виши хармоници во напојниот напон, и тоа е обврска на испорачателот на електричната енергија.

Струите на вишите хармоници минувајќи низ импедансите на мрежата (импедансите се зависни од фреквенцијата) предизвикуваат падови на напони на виши хармоници кои се суперпонираат на основниот хармоник на напонот.

Затоа, се јавуваат струи на виши хармоници и низ оние елементи од мрежата, кои самите по себе не генерираат виши хармоници (на пример, кондензаторите). Тие струи би можеле да бидат доста големи, зависно од импедансите на тие елементи. Затоа, се поставува ограничување и на напонските хармоници во напојниот напон од мрежата.

Во табелата 2 дадени се утврдените виши хармоници на напоните во јавните и индустриските мрежи (според VDE 0839 дел 2-2; EN 61000 дел 2-2) и за нисконапонските мрежи.

**Табела2 :** Ниво на подносливост за вишите хармоници на напонот (референтни нивои за хармоници)

ред h	ниво на подносливост во %				
	нисконап. мрежа	среднонап. мрежа	Индустриски постројки		
			класа 1	класа 2	класа 3
5	6,0	6,0	3,0	6,0	8,0
7	5,0	5,0	3,0	5,0	7,0
11	3,5	3,5	3,0	3,5	5,0
13	3,0	3,0	3,0	3,0	4,5
17	2,0	2,0	2,0	2,0	4,0
19	1,5	1,5	1,5	1,5	4,0
23	1,5	1,5	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	1,5	1,5	3,5
>25	0,2+0,5*25/h	0,2+1,3*25/h	0,2+12,5/h <i>THD</i> = 5%	0,2+12,5/h <i>THD</i> = 8%	$5 \cdot \sqrt{(11/h)}$ <i>THD</i> = 10%
непарни, вредности на h деливи со 3 *1)					
3	5,0	5,0	3,0	5,0	6,0
9	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,3	0,3	0,3	2,0
21	0,2	0,2	0,2	0,2	1,75
>21	0,2	0,2	0,2	0,2	1,0
парни вредности на h					
2	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0
4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
6	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0
8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
10	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0
>10	0,2	0,2	0,2	0,2	1,0

\*1) Вредностите за 3. и 9 виш хармоник важат за среднонапонската област само за мрежите за еднофазна наизменична струја. Во трифазните мрежи за наизменична струја треба да се земе 1/3 од нивото на подносливост на горе наведените вредности. Во нисконапонските мрежи вредат дадените нивои на подносливост.

При ова нивото на подносливост за нисконапонски и среднонапонски мрежи до 25 -ти хармоник се идентични. За индустриските постројки важат малку поинакви вредности (VDE 0839 дел 2-4 и EN 61000 дел 2-4). Таму се дефинираат 3 класи:  
Класа 1: Заштитени напојувања, напојувања на компјутери соби за автоматска обработка на податоци, автоматики, технички лаборатории, заштити; Додатен услов:  $THD(U) = 5\%$

2. Класа 2: Точка на приклучување со јавната мрежа, ниво на подносливост според VDE 0839 дел 2-2 и дел 88. Додатен услов:  $THD(U) = 8\%$

3. Класа 3: Внатрешни приклучоци на опрема, како апарати за заварување, при чести стартирања на мотори, постројки за насочена (исправена) струја и други. Додатен услов:  $THD(U) = 10\%$

Вредностите во табелата 2 за индустриските постројки се допуштени трајно. Кратковремено, за време од 10% од еден интервал од 150 секунди, допуштени се и 1,5 пати поголеми вредности.

### Препораката IEEE 519

Оваа препорака е доста ценета во светот и цитирана во публикации и истражувања. Таа пред се се занимава со вишите хармоници на еден доста комплетен начин. Но има доста разлики во однос на европските норми и препораки, и во однос на пропишаните бројчани износи, и во однос на дефинирањето на напонските нивои, како впрочем скоро се што е карактеристично за Америка во однос на она што е европско. Но има едно многу добро својство кое се коментира со изразот дека “оваа препорака врши праведно распределување на правата меѓу потрошувачите во смисла на искористувањето на капацитетите на мрежата за емитување на пречки”. Имено, тоа се состои во фактот што оваа препорака дозволени емитирани струи на вишите хармоници на клиентот ги прави зависни од моќноста на куса врка во местото на зединички приклучок и од преземената (договорената) моќност на потрошувачот. Ова се гледа од подолу прикажаните табели.

На пример, за еден потрошувач приклучен на висок напон имаме вакви дозволени струјни хармоници:

Табела: IEEE лимити за изобличеност на струја за општи преносни системи со напон  $69kV < U < 161kV$

IEEE Std 519-1992					
$I_{sc}/I_t$	$<11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h > 35$
$<20^{18}$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25
$50 < 100$	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35
$100 < 1000$	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5
$> 1000$	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7

Парните хармоници се ограничени на 25% од нейарните дадени погоре. Струјни изобличувања кои предизвикуваат d-c офсет не се дозволени, на пр. полубранови исправувачи.

$I_{sc}$  е максималната струја на куса врска во точката на заедничко приклучување.  $I_t$  е максимална побарана струја (основна фреквенција) во точката на заедничко приклучување.

Кај уреди кои генерираат ова се граници за струјна изобличеност без оглед на односот  $I_{sc}/I_t$  (Сопствено производство на ел. ен. одвоено од мрежата)

<sup>18</sup> Кај уреди кои генерираат ова се граници за струјна изобличеност без оглед на односот  $I_{sc}/I_t$  (Сопствено производство на ел. ен. одвоено од мрежата)



Гледаме дека колку е потрошувачот послаб во однос на моќноста на куса врска, тој може да зема процентуално повисоки хармоници.

Вакви таблици постојат и за други напонски нивои, за ниво 120V до 69 kV, како и за преносно напонско ниво со напон >161 kV. За среден напон (120 V до 69 kV важи оваа таблица:

*Гранично дозволени сѝрујни хармоници зависно од односои на ѝорачанати моќноси и моќниоси на куса врска сѝред IEEE 519.Наи. ниво 120 V-kV.*

$I_{sc}/I_t$	р е д н а х а р м о н и к о т					THD(I)
	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h > 35$	
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15
>1000	5.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20

*Парниите хармоници се оѝраничени на 25% од неѝарниите дадени ѝоѝоре*

*Сѝрујни изобличувања кои ѝредизвикуваат d-сд офсеи не се дозволени, наиr. ѝолубранови исѝравувачи*

*\*)Кај уреди кои ѝгенерираат ова се ѝграници за сѝрујна изобличеноси без оѝлед на односои  $I_{sc}/I_t$*

*$I_{sc}$  е максималната сѝруја на куса врска во ѝочкаи на заедничко ѝриклучување*

*$I_t$  е максимална ѝобарана сѝруја (основна фреквенција) во ѝочкаи на заедничко ѝриклучување*

За преносните системи со напон поголем од 161 kV вреди оваа таблица:

Индивидуални хармоници (само непарни)						
$I_{sc} / I_t$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

*Парниите хармонички се оѝраничени на 25% од неѝарниите дадени ѝоѝоре*

*Сѝрујни изобличувања кои ѝредизвикуваат d-ц офсеи не се дозволени, нѝr. ѝолубранови ѝреѝворувачи*

*Кај уреди кои ѝгенерираат ова се ѝграници за сѝрујна изобличеноси без оѝлед на односои  $I_{sc}/I_t$*

*$I_{sc}$  е максималната сѝруја на куса врска во ѝочкаи на заедничко ѝриклучување*

$I_1$  е максимална побарана струја (основна фреквенција) во точката на заедничко приклучување

Кај уреди кои генерираат ова се граници за струјна изобличеност без оглед на односот  $I_{sc}/I_1$ . (Сопствено производство на ел. ен. одвоено од мрежата)

За изобличувањето на напонот (што е обврска на испорачателот на ел. енергија) препораката IEEE ги дава следните лимити:

Максимална изобличеност	Напонско ниво		
	69 kV и помалку	69-138 kV	>138 kV
Поединечен хармоник %	3.0	1.5	1.0
Вкупна изоблич. THDU (%)	5.0	2.5	1.5

### Прашања за самопроверка

1. Преодни појави. Која е причината за нивното настанување? Каква е поделбата?
2. Дефинирај што се тоа хармоници, што се интерхармоници. Каква е разликата меѓу нив?
3. Направи разлика меѓу хармоници и преодни појави (транзиенти). Може ли и преодните појави да се разложат на хармоници и што ќе се добие?
4. Направи разлика меѓу хармоници и засеци. Може ли и засеците да се разложат на хармоници и што ќе се добие?
5. Што е тоа Фликер? По што се разликува таа појава од преодните појави и од бавните напонски промени? Кои се причините за појава на фликер?
6. Кога е можно да се зборува за варијација на фреквенцијата како симптом на квалитетот на електричната енергија?
7. Ако се земе предвид амплитудата, кои хармоници вообичаено се поголеми, напонските или струјните? Можеш ли да наведеш приближни бројки?
8. што е тоа вистински фактор на моќност, а што е фактор на поместување.
9. Како може да се поправи факторот на моќност на еден потрошувач: а) ако не ма виши хармници на струјата; б) Ако има виши хармоници на струјата.
10. Тројни хармоници. Објасни го помот. Какви последици имаат за трифазниот систем?
11. Како настануваат виши хармоници заради магнетно заситување?
12. Какво е влијанието на вишите хармоници врз потрошувачите? (накратко). Како принципиелно се решава овој проблем?
13. Како зависи од фреквенцијата: Импедансата на системот? Импедансата на кондензаторите и другите капацитети?
14. Нацртај еквивалентна шема на системот во кој има виши хармоници и капацитети. Кои се условите за настанување на резонанција?

15. Кои се симптомите и последиците на појавата на паралелна резонанција?
16. Како принципиелно може да се реши проблемот со паралелна резонанција?
17. Наброј ги принципите (методите) за сузбивање на вишите хармоници. Покрај техничкиот аспект, каков е и економскиот, односно финансискиот. На чиј товар може да се решава истиот?
18. Појасни го методот на филтрирање на хармониците
19. Појасни го методот на изместување на системската резонантна фреквенција
20. Како се лоцира изворот на виши хармоници?
21. Појасни го принципот на паралелни пасивни филтри.
22. Дали сериски филтри имаат некоја примена и каква?
23. Појасни го принципот на паралелни активни филтри.
24. Појасни го настанувањето на смеѓавање на телекомуникационите врски заради хармониците и како се решава овој проблем?
25. Докажи дека хармониците од редот  $h=1,7,13,\dots$  се од директен редослед.
26. Докажи дека хармониците од редот  $h=5,11,17,\dots$  се од инверзен редослед.
27. Докажи дека хармониците од редот  $h=3,9,15,\dots$  се од нулти редослед.