

Sesalni krog

- naprava za kompenzacijo jalove energije in za zmanjševanje višje harmonskih tokov

Bratina Janez

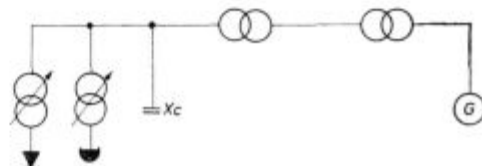
V vsakem večjem zaokroženem elektroenergetskem sistemu se vprašanja elektrotehnike in elektrogospodarstva zelo hitro srečajo pri kompenziranju jalove energije, oz. moči, ki jo jemljejo potrošniki tega sistema iz napajalnega omrežja. Pri manjših sistemih nastopa posamična lokalna ali skupinska centralna kompenzacijska naprava, priključena kot fiksna ali regulacijska skupina kondenzatorjev na nizko napetost. Karakteristike odjema, cena jalove energije in kapitalni stroški kompenzacijske naprave so edina merila za določitev najbolj gospodarske kompenzacijske naprave preprostih porabnikov. S koncentracijo velikih moči, kot jo imamo n. pr. v metalurških obratih, je nujno preiti na visokonapetostno kompenzacijo, kjer se poleg omenjenih meril vsiljujejo nove zahteve in elektrotehnične omejitve, ki jih določajo tako potrošniki kot elektroenergetske naprave. V članku so podane osnove in napotki, s pomočjo katerih se da graditi kompenzacijska naprava tudi v kompliciranih pogojih.

Kompenzacija jalove energije je aktualna v prenosu, distribuciji in eksploataciji električne energije. Ekonomski in nekateri tehnični vidiki kompenzacijskih naprav so široko popularizirani; v večjih elektroenergetskih sistemih, kot npr. v železarnah, pa kompenzacija jalove energije razkrije latentne karakteristike potrošnikov, ki zahtevajo posebno obravnavo in reševanje. Zaradi notranjih izvorov višje harmonskih tokov, ki jih generirajo usmerniške naprave in obločne peči, niso te samo izvor onesnažitve napetosti, temveč predstavljajo nevarnost, da jih kompenzacijske naprave ojačajo. S tem je vprašljiva smiselnost kompenzacije, saj je stvarni faktor moči $\lambda = g \cdot \cos \varphi$ (pri čemer je g razmerje med tokom osnovne frekvence in med celotnim tokom), ta pa je lahko prav zaradi višje harmonskih tokov mnogo manjši od 1, čeprav smo izbrali kompenzacijsko napravo za fazni faktor $\cos \varphi = 1$. Najpogostejše kompenzacijske naprave so kompenzacijski kondenzatorji, katerih značilnost je, da lahko poleg toka osnovne frekvence vodijo brez preobremenitve velike deleže višjih harmonskih tokov; tudi, če je delež višjih harmonskih tokov enak toku osnovne frekvence, je kompenzacijski kondenzator preobremenjen tokovno za $\sqrt{2} = 1,42$, medtem ko

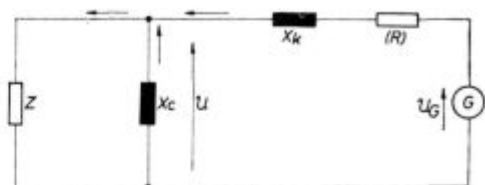
predpisi dopuščajo preobremenitev 1,5. Kompenzacijski kondenzatorji omogočajo poleg kompenzacije jalove energije osnovne frekvence tudi razbremenitev omrežja višjih harmonskih tokov, s čimer dosežemo nadaljnje zboljšanje faktorja moči in čiščenje sinusnega vala napetosti, seveda če kompenzacijske kondenzatorje pravilno vgradimo k potrošniku.

Kondenzator in napajalna mreža

Na sl. 1 je prikazano omrežje, kjer generator električne energije preko transformatorjev napaja potrošnik (usmerniško napravo); potrošnikove potrebe po jalovi energiji krije kompenzacijska



Slika 1
Napajalno omrežje in potrošniki s kompenzacijsko napravo
Fig. 1
Feeding line and consumers with the compensation device



Slika 2
Nadomestna shema omrežja in potrošnikov
Fig. 2
Substitution scheme of the line and consumers

kondenzatorska baterija. Na sl. 2 so prikazane fazne upornosti celotnega sistema. Ohmske upornosti prenosnega sistema bomo zanemarili in bomo računali le z induktivno upornostjo mreže, ki jo diktira kratkostična moč P_k opazovalnega sistema:

$$X_k = \frac{U^2}{P_k}$$

Kapacitivno upornost kondenzatorske baterije dobimo iz njene moči P_c :

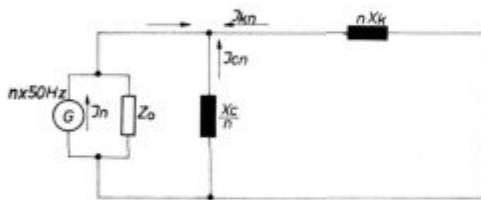
$$X_c = \frac{U^2}{P_c}$$

Bratina Janez je diplomirani inženir elektrotehnike in je vodja elektrotehniške službe v Železarni Ravne.

Za celoten sistem lahko predpostavljamo, da je sestavljen iz linearnih elementov; upornosti omrežja in kondenzatorske baterije niso odvisne niti od velikosti niti od smeri toka. Njihove upornosti so odvisne zgolj od frekvence. Če označimo z n mnogokratnik višje harmonskih tokov proti osnovni frekvenci, se upornosti posameznih elementov omrežja spremenijo s frekvenco, kot sledi:

$$X_{kn} = n \cdot X_k \quad X_{cn} = \frac{X_c}{n}$$

Če gledamo in obračunavamo razmere ob višje harmonskih tokovih, se ne spremenijo samo nastopajoči parametri, temveč tudi nadomestna shema. Generator električne energije za osnovno frekvenco postane za razmere višjih harmonskih tokov pasivni element, ki je že vključen v impedanci mreže. Po drugi strani pa postane usmernik (ali obločna peč) generator; s to razliko, da generira v omrežje, ki je prikazano na sl. 3 tok višje har-



Slika 3

Nadomestna shema omrežja in potrošnikov za višje harmonske tokove

Fig. 3

Substitution scheme of the line and consumers for harmonic currents

monskih ne pa napetost. Iz slike je tudi razvidno, da predstavljata induktivna upornost omrežja in kapacitivna upornost kompenzacijskega kondenzatorja paralelni nihajni krog z vsiljenim višjeharmonskim tokom, ki praktično ni odvisen od impedanc omrežja. Posledica tega je, da z naraščajočo upornostjo nihajnega kroga raste tudi napetost nihajnega kroga. Najvišjo napetost dobimo ob resonančnih pogojih za nihajni krog:

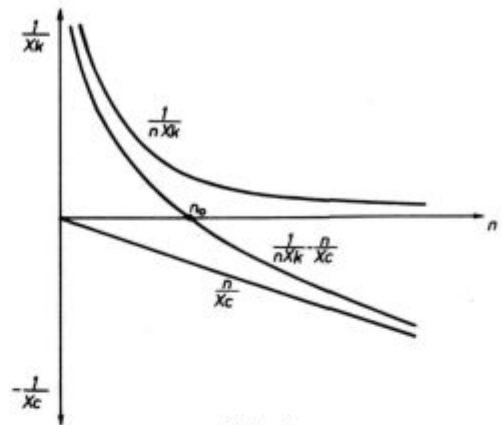
$$X_{kn} = X_{cn}$$

Iz tega sledi, da dobimo resonanco pri n višjem harmonskem toku, če je razmerje impedanc (moči) omrežja in kompenzacijske baterije:

$$n = \sqrt{\frac{X_c}{X_k}} = \sqrt{\frac{P_k}{P_c}}$$

Za 5-harmonsko so resonančni pogoji izpolnjeni, če je moč kompenzacijske baterije (P_c) 1/25 ali 4 % kratkostične moči napajalnega omrežja (P_k). Za 11-harmonsko pa dobimo resonanco že pri kondenzatorski bateriji, katere moč je 0,8 % kratkostične moči. Tu pa smo že globoko v področju, ki ga zahtevajo za kompenzacijske moči večji potrošniški kompleksi.

Vendar ni dovolj, da na osnovi navedenih enačb ugotovimo le, če se nahajamo s svojo kompenzacijsko napravo v resonančnem primeru. Pogledati je potrebno na celoto, ki jo tvorita paralelna upornost mreže in kondenzatorske baterije.



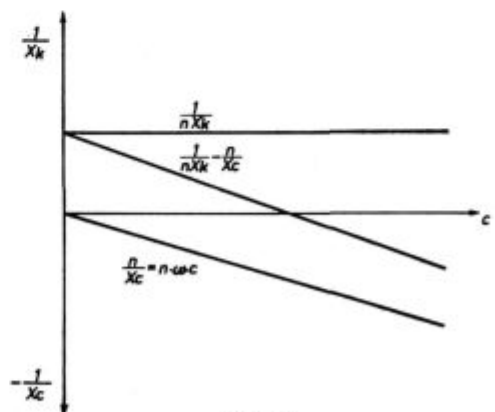
Slika 4

Prevodnost nihajnega kroga omrežja — kondenzatorska baterija v odvisnosti od frekvence

Fig. 4

Conductivity of the oscillating circuit line — bank of condensers depending on the frequency

Na sl. 4 si bomo pogledali odvisnost prevodnosti takšnega nihajnega kroga od frekvence. S prevodnostmi računamo zaradi paralelne vezave. Vidimo, da prevodnost mreže s frekvenco pada, prevodnost kondenzatorjev pa raste. Prevodnost nihajnega kroga predstavlja vsota obeh prevodnosti. V točki, kjer dobimo prevodnost kroga nič, imamo resonanco. Iz krivulj se tudi razbere, da pomeni vgraditev kondenzatorjev v mrežo zmanjšanje njene prevodnosti za vse primere, ko je frekvenca manjša od resonančne frekvence, pa tudi za primere, ko je frekvenca nekaj večja od te kritične točke. Šele pri precej višjih frekvencah postane prevodnost nihajnega kroga večja kot je prevodnost same mreže. Na sl. 5 je prikazana odvisnost prevodnosti nihajnega kroga od velikosti



Slika 5

Prevodnost nihajnega kroga omrežja — kondenzatorska baterija v odvisnosti od kapacitivnosti baterije

Fig. 5

Conductivity of the line — bank of condensers oscillating circuit depending on the bank capacity

kondzatorske baterije (pri konstantni frekven-
ci). Vidimo, da je prevodnost mreže konstantna,
prevodnost kondenzatorjev pa z njihovo velikostjo
raste. Pri resonančnih pogojih je prevodnost ni-
hajnega kroga nič. Iz sl. 5 je razvidno, da prevod-
nost nihajnega kroga z naraščajočo kapacitiv-
nostjo baterije pada (do vrednosti nič), nato pa
ponovno narašča. Nihajni krog bo dobil večjo pre-
vodnost od omrežja šele takrat, ko bo prevodnost
kondenzatorjev vsaj dvakrat tolikšna kot omrežja.

Ta izvajanja so bila važna zaradi tega, da smo
ugotovili, v katerih primerih pomeni vgradnja
kompensacijskih kondenzatorjev povečanje upornosti
sistema kondenzator — mreža, kajti ne samo
ob resonanci, temveč v vseh teh primerih pomeni
to za v omrežju nastopajoče višje harmonske to-
kove njihovo pojačanje. Vsiljeni višje harmonski
tokovi povzročijo v paralelnem nihajnem krogu
večji padec napetosti, ki vodi k povečanju teh to-
kov znotraj nihajnega kroga, torej med kondenzator-
sko baterijo (potrošnikom) in omrežjem.

Upornost paralelnega nihajnega kroga je:

$$X_r = \frac{1}{\frac{1}{X_{kn}} - \frac{1}{X_{cn}}} = \frac{X_{kn} \cdot X_{cn}}{X_{cn} - X_{kn}}$$

Napetost, ki jo povzroči vsiljen tok višje har-
monskega toka I_n na nihajnem krogu, je:

$$U_r = I_n \cdot X_r$$

Tok, ki ga povzroči vsiljen višje harmonski tok
v omrežju, je:

$$I_{kn} = \frac{U_r}{X_{kn}} = I_n \frac{X_r}{X_{kn}} = I_n \frac{X_{cn}}{X_{cn} - X_{kn}} = I_n \frac{1}{1 - n^2 P_c/P_k}$$

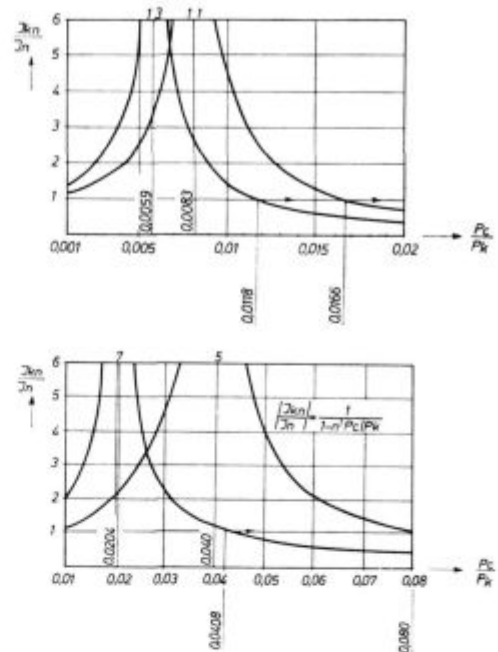
Tok, ki ga povzroči vsiljen harmonski tok skozi
kondzatorsko baterijo:

$$I_{cn} = \frac{U_r}{X_{cn}} = I_n \frac{X_r}{X_{cn}} = I_n \frac{X_{kn}}{X_{cn} - X_{kn}} = I_n \frac{n^2}{P_k/P_c - n^2}$$

Na sl. 6 so na podlagi zgornjih enačb izračunane
resonančne krivulje, ki kažejo odvisnost višje
harmonskih tokov za $n = 5, 7, 11, 13$ za posamezna
razmerja kondzatorske moči proti kratkostični
moči omrežja. Poleg jasno izraženih resonančnih
pogojev, vidimo, da pomeni vgraditev kompenza-
cijskih kondenzatorjev skoraj v vseh primerih
večanje višje harmonskih tokov v omrežju. Ti to-
kovi se v omrežju zmanjšajo šele, če moč kompen-
zacijskih kondenzatorjev preseže določeno vred-
nost. Vrednosti se dajo izračunati iz neenačbe:

$$P_c/P_k \geq \frac{2}{n^2}$$

Nevarnostim ojačanja višje harmonskim tokovom
 $n = 5$ ($n = 7$) se bomo torej izognili, če bomo
vgradili kompensacijsko baterijo, ki ima 8 %
(4 %) kratkostične moči mreže. Tako velike kom-
pensacijske moči so redke.



Slika 6
Resonančne krivulje za $n = 5, 7, 11, 13$
Fig. 6
Resonance curves for $n = 5, 7, 11, 13$

Nevarnostim, ki jih prinaša vgraditev kondenzatorjev v sistem, se lahko izognemo tako, da vgradimo pred kondenzator dušilko take impedance, da bo njih skupna upornost za višje harmonske predstavljala vedno induktivno upornost. V tem primeru ne bomo dobili paralelnega nihajnega kroga iz induktivnosti mreže in kapacitivnosti kondenzatorja, ker se zaradi pred kondenzator vgrajene dušilke ta za višje harmonske ponaša kot induktivna upornost: dobimo torej dvoje paralelnih induktivnih upornosti, ki pa ne moreta ustvariti resonančnih pogojev. Dušilka, ki je serijsko postavljena pred kondenzator, zapira višje harmonskim tokovom pot v kondenzator, zato ji pravimo tudi zaporna dušilka. Vrednost, ki jo mora imeti dušilka, da postane zaporna, sledi iz pogoja, da se morata dušilka in kondenzator za višje harmonske tokove vesti induktivno:

$$X = X_D - X_C = X_D \cdot n - \frac{X_c}{n}$$

torej pri pogoju, da je

$$X_D \cdot n > \frac{X_c}{n}$$

$$X_D > \frac{1}{n^2} X_c$$

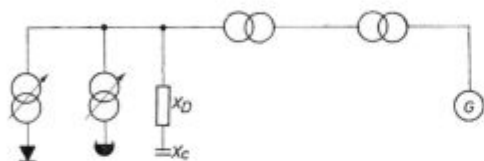
Iz te neenačbe sledi, da mora imeti dušilka za najnižje pričakovani višje harmonski tok ($n = 5$) minimalno vrednost 4 % upornosti kondzatorske baterije. 4 % vrednost bi nam dala resonančne pogoje za serijsko vezano dušilko in kondenzator, zato izberemo bistveno višjo vrednost. Običajno računamo vsaj s 6 % dušilko. Zavedati pa se je

potrebno, da nam 6 % dušilka porabi 6 % kompenzacijske moči kondenzatorjev za magnetizacijo in da se zaradi dušilke na kondenzatorjih približno za enak procent poveča napetost.

Sesalni krog

Zamisel o dušilki kot induktivni upornosti, ki jo vežemo v serijo pred kondenzatorje, pa predstavlja prav tako možnost, da bosta ta dva pasivna elementa ustvarila v določenih pogojih serijski resonančni krog (sl. 7). Resonančni pogoji nastopijo pri dušilki impedance X_D :

$$X_D = \frac{1}{n_o^2} X_c$$



Slika 7

Napajalno omrežje in potrošniki s kompenzacijsko napravo s sesalnim krogom

Fig. 7

Feeding line and consumers with the suction circuit as a compensator

Upornost takega resonančnega kroga za oni višji harmonski tok, za katerega je ta uglašen, je enaka nič in predstavlja za ta tok kratek stik. Celoten višji harmonski tok bo torej iz omrežja izsesali. Zato tudi pravimo takemu resonančnemu krogu sesalni krog. Iz zgornje enačbe lahko ugotovimo, da potrebujemo za posamezne n — harmonske tokove dušilke takih vrednosti:

n_o	5	7	11	13
X_D/X_c	0,04	0,024	0,0083	0,0059

Zaradi omejitev vklopnih tokov kondenzatorjev je priporočljivo pred kondenzatorje vgraditi vklopno dušilko, ki mora imeti 1 % do 1,5 % upornosti kondenzatorjev. Iz zgornje tabele pa je razvidno, da nam lahko za 5 in z harmonsko le nekoliko večja, za 11 in 13 pa zgolj točneje definirana vklopna dušilka, že naredi ustrezen sesalni krog.

Zaporedna vezava induktivne in kapacitivne upornosti pa ustvarja tudi za tokove nazivne frekvence spremembe razmer: tako dobimo na kondenzatorju za toliko povišano napetost, kolikoršen je padec napetosti na dušilki

$$U_c/U = \frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} = a$$

$$U_D/U = \frac{1}{n_o^2 - 1} = b$$

V spodnji tabeli so izračunane vrednosti iz enačb

n_o	5	7	11	13
U_c/U	1,042	1,021	1,008	1,006
U_D/U	0,042	0,021	0,008	0,006

Kompenzacijska moč na kondenzatorju je torej sestavljena iz kompenzacijske moči kondenzatorja osnovne frekvence:

$$P_{cl} = 3a^2 U_f^2 \omega C$$

kjer računamo s fazno napetostjo U_f , s krožno frekvenco ω in kapacitivnostjo kondenzatorjev C ter iz jalovega višje harmonskega toka I_n , ki ga iz omrežja sesa krog:

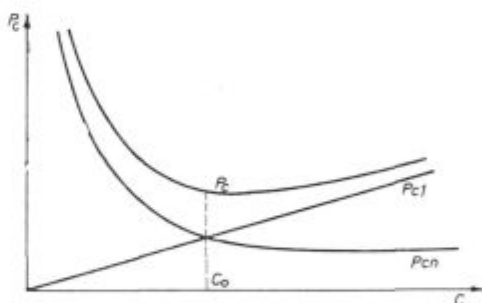
$$P_{cn} = \frac{3 I_n^2}{n \omega C}$$

Za kondenzatorsko baterijo je merodajna skupna moč

$$P_c = P_{cl} + P_{cn} = 3a^2 U_f^2 \omega C + \frac{3 I_n^2}{n \omega C}$$

Iz sl. 8 je razviden potek posameznih moči v odvisnosti od kapacitivnosti baterije. Kompenzacijska moč osnovne frekvence raste sorazmerno s kapacitivnostjo, kompenzacijska moč višje harmonske pa obratno sorazmerno s kapacitivnostjo. Kondenzator, kjer bo skupna moč najmanjša, dobimo iz pogojev

$$\frac{d P_c}{d C} = 0 \rightarrow C_o = \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{I_n}{a \omega U_f}$$



Slika 8

Kompenzacijske moči osnovnega toka in višje harmonskega toka v odvisnosti od kapacitivnosti baterije

Fig. 8

Compensating effect of basic current and harmonic currents depending on the capacity of the bank of condensers

Ta pogoj je tudi dosežen, ko je $P_{cl} = P_{cn}$! Iz sl. 8 tudi sledi, da je sesalni krog možen pri majhnih kapacitivnostih. Vidno pa je, da s tako kapacitivnostjo ne bi dosegli velikega efekta v kompenzaciji jalovih moči osnovne frekvence in da bi kondenzatorjevo moč pravzaprav že definirala moč višje harmonskega toka. Osnova za določanje kapacitivnosti kondenzatorske baterije je seveda potreba po jalovi energiji, oz. jalovi moči (P_{cl}) osnovne frekvence, ki jo zahtevajo potrošniki.

Zato se odločamo za velike kapacitivnosti C in velike moči P_{ct} . S tem pa pada tudi delež moči višje harmonskega toka (P_{cn}) v skupnem deležu moči (P_c) kompenzacijske baterije. Skupni efektivni tok osnovnega in višjega harmonskega toka dobimo iz enačbe

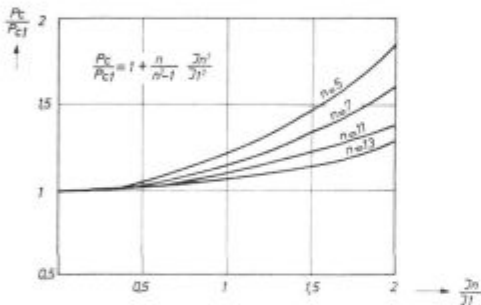
$$I = \sqrt{I_1^2 + I_n^2}$$

S pomočjo prej navedenih enačb pa se da izraziti odnos moči v odvisnosti od tokov

$$\frac{P_c}{P_{ct}} = 1 + \frac{n}{n^2 - 1} \frac{I_n^2}{I_1^2}$$

Enačba je grafično prikazana na sl. 9, kjer se vidi, da višje harmonski tokovi glede na moč slabo obremenjujejo kondenzatorje. Če računamo z maksimalno dopustno tokovno obremenitvijo kondenzatorjev $I = 1,5 I_1$, kakor jo dopuščajo predpisi, nam to da najvišji še dopustni višji harmonski tok skozi kondenzator:

$$\frac{I_n}{I_1} = \sqrt{\frac{P_c}{P_{ct}} - 1} = \sqrt{1,5^2 - 1} = 1,12$$



Slika 9

Razmerje kompenzacijskih moči v odvisnosti od razmerja tokov

Fig. 9

Ratio of compensating effects related to the current ratio

Tak najvišje dopustni višje harmonski tok pa po moči preobremenil kondenzatorsko baterijo pri 5-harmonskem toku 26 %, pri 7-harmonskem toku 18,5 %, pri 11-harmonskem toku 11,5 ter pri 13-harmonskem toku 9,7 %.

Za dimenzioniranje sesalnega kroga je zatorej izhajati predvsem iz potreb po jalovi energiji ali jalovi moči osnovne frekvence potrošnikov; preko te je lahko že dokončno definirana kapacitivnost kompenzacijske baterije. To lahko spremenimo zelo močni posamezni višje harmonski tokovi lastnih potrošnikov ali pa celo višje harmonski tokovi, ki prihajajo preko magistralnih napajalnih vodov v sesalni krog kompenzacijske naprave.

Sesalni krog in mreža

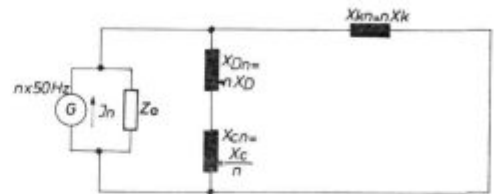
Zaradi jasnosti smo posamezne elemente sesalnega kroga in mreže skupno prikazali na sl. 10 za razmere, kakršne nastajajo pri višje harmon-

skih tokovih, katerih izvor je generator G. Z mnogokratnikom višje harmonskih tokov n se posamezne upornosti spreminjajo:

upornost mreže $X_{Kn} = n \cdot X_K$

upornost dušilke $X_{Dn} = n \cdot X_D$

upornost kompen. baterije $X_{Cn} = \frac{X_c}{n}$



Slika 10

Nadomestna shema napajalnega omrežja, potrošnikov in kompenzacijske naprave s sesalnim krogom

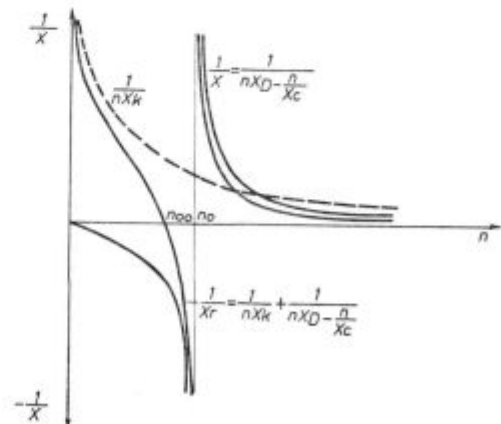
Fig. 10

Substitution scheme of the feeding line, consumers and the suction circuit as a compensator

Serijska vezava upornosti dušilke in kapacitivne upornosti kompenzacije lahko izrazimo z nadomestno upornostjo:

$$X'_n = nX_D - \frac{X_c}{n}$$

Ta pa nastopa v paralelni vezavi z upornostjo mreže. Te razmere so v odvisnosti od n prikazane na sl. 11, kjer se jasno vidi, da je nadomestna ali skupna prevodnost vseh nastopajočih elementov za resonančno frekvenco neskončna. Novi moment, ki nastopa pri obračunu z upoštevanjem elementov sesalni krog in mreža, pa je prav tako razviden iz sl. 11: pri določeni frekvenci n_{∞} postane prevodnost sistema nič, oz. upornost neskončna. To pa pomeni, da se bodo vsi morebitni višje harmonski tokovi v okolici n_{∞} močno ojačali in tako ojačani tekli v mrežo. Pri projektira-



Slika 11

Prevodnost omrežja — sesalni krog v odvisnosti od frekvence

Fig. 11

Conductivity of the line-suction circuit system depending on the frequency

nju torej ni dovolj spoznati razmere v resonanci, temveč so nevarne razmere za višje harmonske tokove onih frekvenc, ki so nižje od resonančne.

Iz zgoraj nakazanega obračuna nadomestne vezave elementov po sl. 10 se da izraziti razmerje:

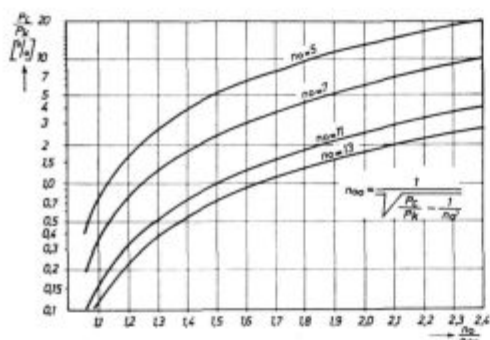
$$\frac{X_k}{X_r} = \frac{n P_c/P_k}{\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 - 1} + \frac{1}{n}$$

kjer so: X_r — nadomestna upornost sistema
 n_0 — mnogokratnik resonančne frekvence

Iz pogoja za $X_k/X_r = 0$ lahko dobimo frekvenco n_{oo} , pri kateri je prevodnost sistema nič:

$$n_{oo} = \frac{1}{\sqrt{P_c/P_k + \frac{1}{n_0^2}}}$$

Ta odnos je prikazan na sl. 12. Iz znanih n_0 in n_{oo} lahko ugotovimo, pri katerem razmerju P_c/P_k dobimo kritično območje. Na pr.: imamo sesalni krog za 7-harmonsko ($n_0 = 7$); v omrežju nastopajo tudi izraziti 5-harmonski tokovi. Kritično območje za 5-harmonske ($n_{oo} = 5$) bo pri razmerju $P_c/P_k = 2\%$.



Slika 12

Korelacije pogojev, ob katerih je upornost sistema mreža — sesalni krog neskončna

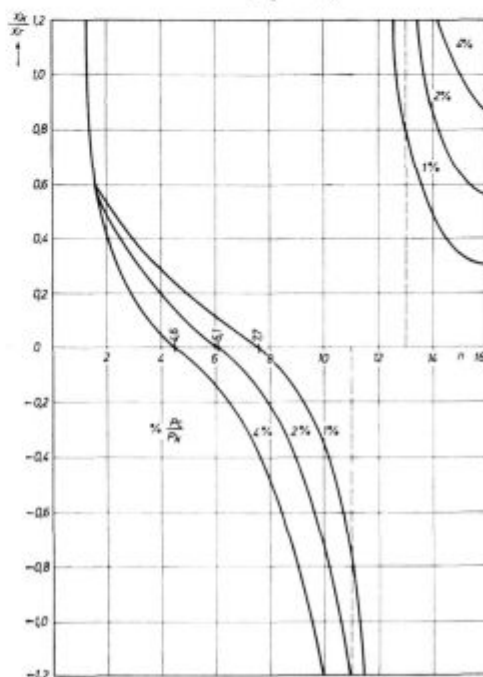
Fig. 12

Correlations of conditions that the resistivity of the line — suction circuit system is infinite

Analiza razmer celotnega sistema pa se ne more zadovoljiti samo z določitvijo ene karakteristike, na pr. z določitvijo n_{oo} . Na sl. 13 je prikazan potek X_k/X_r za $n_0 = 12$ za različne P_c/P_k . Iz poteka je razvidno, da se z večanjem moči kondenzatorske baterije P_c ali z padanjem kratkostične moči omrežja (P_k) zmanjšuje kritična frekvenca n_{oo} in se širi resonančno območje. Vidimo, da nam velike kompenzacijske moči, oz. majhne kratkostične moči v sistemih, kjer nastopa več višje harmonskih tokov, ne bodo povzročale težav. Prav tako je na dlani rešitev za take sisteme, kjer imamo več višje harmonskih tokov, namreč, da je najprej potrebno zgraditi sesalni krog za najnižji nastopajoči višje harmonski tok (npr.: 5), naslednja stopnja v izgradnji bo šele sesalni krog za naslednjo harmonsko (na pr. 7).

Razmerje med vsiljenim višje harmonskim tokom (I_n) in višje harmonskim tokom, ki ga absorbira omrežje (I_{kn}), smo za enostaven primer že izrazili v prvem poglavju. Na izvajanju tega poglavja tj. na upoštevanju vseh nastopajočih elementov, se to razmerje da izraziti:

$$\frac{I_n}{I_{kn}} = \frac{X_k \cdot n}{X_r} = \frac{P_c/P_k}{1 - \frac{1}{n_0^2}} + 1$$



Slika 13

Prevodnost sistema omrežje — sesalni krog za $n = 12$

Fig. 13

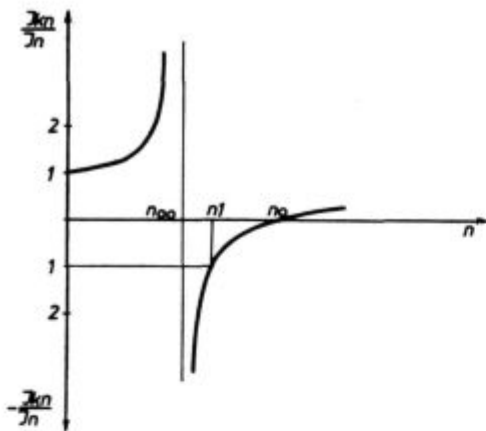
Conductivity of the line — suction circuit system for $n = 12$

Enačba sama ne pove dosti, njena funkcija, ki je prikazana na sl. 14 pa ima določene značilnosti. Jasno je vidno, da je za višje harmonske tokove višjega reda od n_0 razmerje I_{kn}/I_n manjše od 1, kar pomeni, da se ti višje harmonski tokovi z vgradnjo sesalnega kroga za frekvenco n_0 slabijo. Iz slike je tudi razvidno, da mejne vrednosti ne predstavlja n_0 , niti n_{oo} , temveč tisti harmonski tok (n_1) imenujemo ga kritični harmonski, pri katerem je razmerje $I_{kn}/I_n = 1$. Pri harmonskih tokih, ki so manjšega reda, dobimo ojačenje teh harmonskih tokov v omrežju, za one pa, ki so večji od n_1 , pa slabljenje.

Iz prejšnje enačbe sledi izraz za kritični mnogokotnik višje harmonskega toka

$$n_1 = \frac{1}{\sqrt{0,5 P_c/P_k + \frac{1}{n_0^2}}}$$

Iz sl. 14 je ponovno razvidno, zakaj gradimo najprej sesalni krog za višje harmonski tok najnižjega reda. Z določenimi pogoji lahko nastanejo



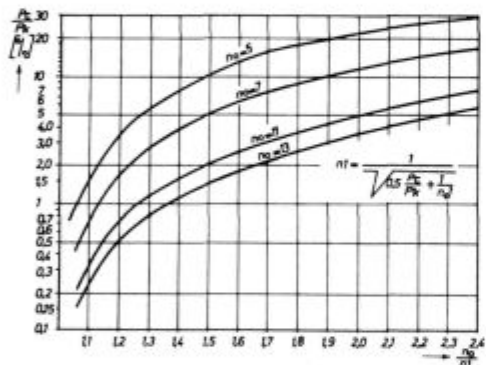
Slika 14

Razmerje med omrežnim višje harmonskim tokom in vsiljenim višje harmonskim tokom za sistem omrežje — sesalni krog

Fig. 14

Ratio between the line harmonic current and the imposed harmonic current for the line — suction circuit system

namreč okoliščine, v katerih bi lahko za harmonski tok najnižjega reda nastopile ojačitve v omrežju. Če ugotovimo, da je ta tok frekvenčno višji od n_1 , ni bojzani za ojačitev. Slika funkcije za n_1 je prikazana na sl. 15.



Slika 15

Korelacija pogojev, ob katerih nastopa slabljenje omrežnih višje harmonskih tokov za sistem omrežje — sesalni krog

Fig. 15

Correlation of conditions that line harmonic currents are minimized in the line — suction circuit system

Jačanje višje harmonskih tokov, ki imajo svoje izvore pri potrošnikih, na omrežni strani, ni samo kritično zaradi povečanja prenosnih izgub, deformacije napetosti, slabšanja faznega faktorja, povzročanja motenj, itd., ampak ima lahko direktno posledico, t.j. povečanje obremenitve kompenzacijskih kondenzatorjev.

Ojačani višje harmonski tokovi so posledica paralelnega nihajnega kroga med sesalnim krogom, ki je za te nižje harmonske tokove postal kapacitiven, in mrežo, ki je v vsakem primeru induktivna. Tokovi se večajo in odštevajo tako, da je razlika med tokom iz omrežja in tokom skozi kompenzacijsko baterijo enaka vsiljenemu toku:

$$I_n = I_{kn} - I_{cn}$$

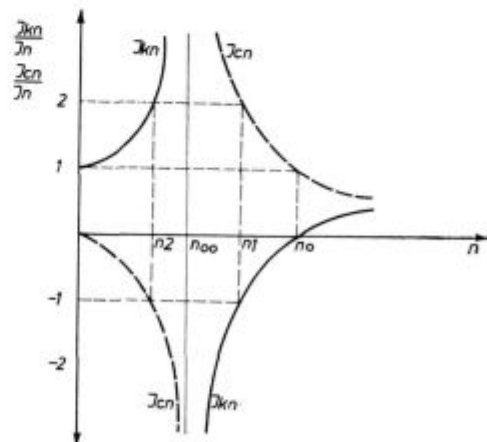
Tok skozi kompenzacijsko baterijo se da izračunati iz tele relacije:

$$\frac{I_n}{I_{cn}} = \frac{1}{n_0^2 - n^2} P_c/P_k + 1$$

Tudi iz te enačbe si lahko izračunamo karakteristično vrednost za n , pri kateri postane tok skozi baterijo večji od generiranega višjega harmonskega toka:

$$n_2 = \frac{1}{\sqrt{2 P_c/P_k + \frac{1}{n_0^2}}}$$

Na sl. 16 so ponovno prikazani višje harmonski tokovi, ki jih povzroči vsiljeni tok I_n na omrežni strani (I_{kn}) in na kondenzatorski strani (I_{cn}). Vidimo, da se za vse primere višjih harmonskih tokov, katerih frekvenca je večja od kritične vrednosti n_1 , mrežni in kondenzatorski tok zmanjšata ($I_{kn}/I_n < 1$, $I_{cn}/I_n < 2$). Njeni vrednosti sta za frekvenci večje od n_0 pozitivni. V primeru resonance (n_0) je višje harmonski tok v omrežju nič ($I_{kn} = 0$), kajti vsega absorbira sesalni krog ($I_{cn} = I_n$). Pri harmonskih tokovih z nižjimi frekvencami od n_0 se smer omrežnega toka (I_{kn}) obrne. Pri potrošnikih generirani višje harmonski tok povzroči pritikanje toka te frekvence iz omrežja. Pri frekvencah, manjših od n_1 , je ta višje harmonski tok večji od generiranega. Dobimo torej ojačanje omrežnega toka! Istočasno se krepi tudi višje harmonski tok skozi kondenzatorsko baterijo, saj je tudi zdaj razlika teh dveh tokov generirani višje harmonski tok. Pri frekvenci n_{oo} je ta okrepitev višje harmonskih tokov (I_{kn} , I_{cn}) neskončno. Pri frekvenci n_2 dobimo kondenzatorski tok, ki je enak generiranemu ($I_{cn} = I_n$), omrežni tok pa je seveda tudi dvojne vrednosti ($I_{kn} = 2 I_n$). Pri frek-



Slika 16

Omrežni in kondenzatorski višje harmonski tokovi za sistem omrežje — sesalni krog.

Fig. 16

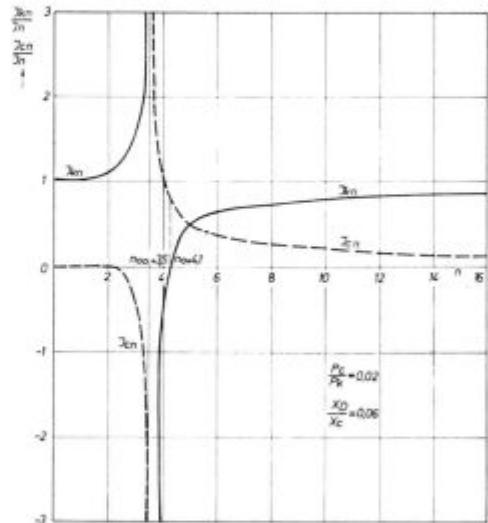
Line and condenser harmonic currents for the line — suction circuit system

vencah manjših od n_{∞} se obrneta tudi smeri obeh višje harmonskih tokov: I_{kn} teče v omrežje, I_{cn} pa iz kondenzatorske baterije.

Sesalne kroge za posamezne frekvence je potrebno graditi po vrsti nastopajočih višjih harmonskih: najprej za 5, nato 7 itd. Tudi vklapljati jih je v takem vrstem redu, izklapljati pa v obratnem. Ni pa potrebno vedno graditi sesalnih krogov za vse nastopajoče frekvence: v določenih pogojih lahko sesalni krog uporabimo za dva sosednja harmonska tokova, na pr. s tem, da zgradimo za 11- in 13-harmonski tok sesalni krog z resonančno frekvenco $n = 12$. Iz sl. 16 je razvidno, da bomo dobili v omrežju oba toka (11 in 13) močno oslABLJENA, vendar le s pogojem, da bo kritična frekvenca n_1 manjša od 11. Na sl. 17 so prikazane izračunane vrednosti za tak primer, iz katerih je razvidno, da lahko sesalni krog $n = 12$ uporabimo vedno, razen če ni razmerje P_c/P_k pod 0,25 %, torej skoraj v vseh primerih. Iz sl. 17 pa je tudi razvidno, da je tak sesalni krog nevaren v primeru, če imamo v omrežju nastopajoči 5- ali 7-harmonski tok.

Na osnovah tega poglavja bomo glede na delovanje že opisane zaporne dušilke ugotovili, da do-bimo zaradi njene visoke upornosti ($X_D/X_C = 0,06$) nizko resonančno frekvenco ($n_0 = 4,1$) ter npr. za $P_c/P_k = 0,02$ nizko kritično frekvenco $n_1 = 3,8$. Vidi se, da imajo vsi višji harmonski tokovi ki nastopajo v omrežju, višjo frekvenco od kritične in zato ne more priti do nikakršnih ojačan-j teh tokov. Opisane razmere so prikazane na sl. 18,

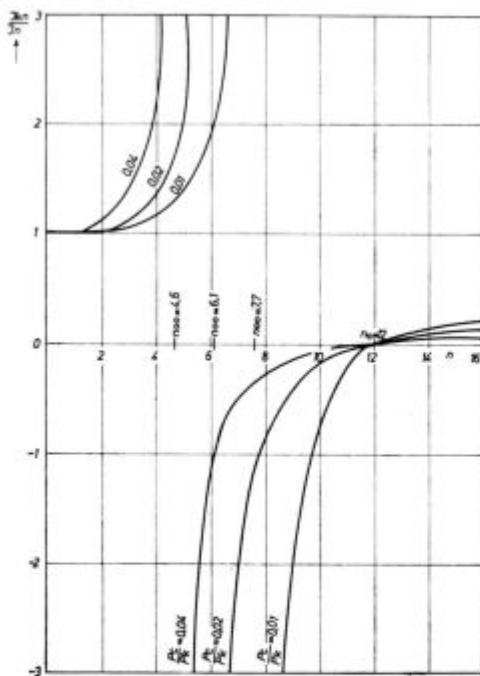
kjer se vidi, da zaporna dušilka razdeli tokove višjih harmonskih frekvenc na omrežje (I_{kn}) in na kondenzatorsko baterijo (I_{cn}) ter jih zmanjšuje v vsakem primeru, in to tako, da je njih vsota enaka toku izvora (I_n).



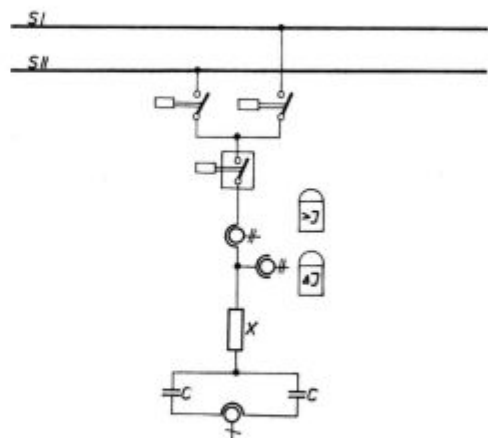
Slika 18 Tokovne razmere pri zaporni dušilki Fig. 18 Current conditions at the blocking choke

Gradnja sesalnega kroga

Sesalne kroge gradimo običajno za visokonapetostno, oz. sredjenapetostno kompenzacijo napetosti od 5 kV do 35 kV. Shema celotne naprave je prikazana na sl. 19, kjer se vidi, da je sesalni krog priklopljen na klasično opremljeno visokonapetostno celico z ustrezno močnim stikalom ter pretokovnimi zaščitnimi napravami. Dušilka je običajno zgrajena kot zračna dušilka za notranjo ali zunanjo montažo. Važno je, da ima ustrezno kratkostično trdnost, ker je njena kratkostična napetost običajno nizka — kot že omenjeno — od-

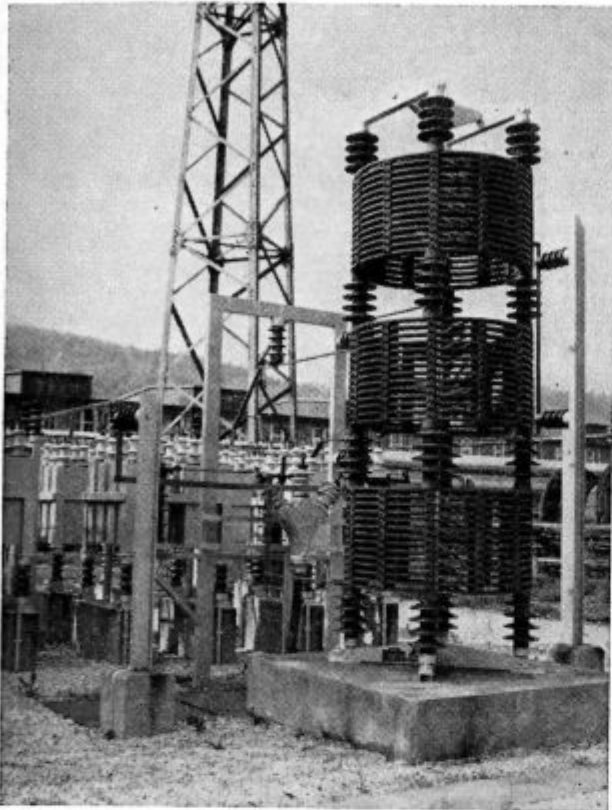


Slika 17 Omrežni višje harmonski tokovi za sistem omrežje — sesalni krog za $n = 12$ Fig. 17 Line harmonic currents for the line — suction circuit system for $n = 12$



Slika 19 Visokonapetostna kompenzacijska naprava s sesalnim krogom Fig. 19 High tension compensator with suction circuit

visna od frekvence višjeharmonskega toka ter moči kondenzatorske baterije. Visokonapetostne kondenzatorje razdelimo v dve v zvezdo vezani skupini; v posamezni fazi, odvisno od napetosti



Slika 20

Kompensacijska naprava Zelezarne Ravne 2400 kVAr 20 kV s sesalnim krogom za 250 Hz (projekt in izvedba IMP Ljubljana)

Fig. 20

Compensator, 2400 kVAr — 20 kV in Ravne Ironworks, with 250 c. p. s. suction circuit (Engineering and construction by IMP, Ljubljana)

imamo lahko tudi več zaporednih kondenzatorjev. Običajno izberemo kondenzatorsko napetost nekaj višjo od nazivne, saj bomo del kondenzatorske moči potrebovali poleg osnovne frekvence še za moč, ki jo bomo dobili iz višjeharmonskega toka resonančne frekvence. Če izberemo n. pr. za sesalni krog za ($n = 5$) 15 % višjo napetost kondenzatorjev, odpade od tega 4 % na povečano napetost na kondenzatorjih zaradi pred njimi vgrajene dušilke in nam ostane za povečanje moči le 11 % napetosti. Dejansko pomeni to 11 % povečanje napetosti 21 % zmanjšanje moči osnovne frekvence: kompensacijske moči bomo torej dobili le 79 %, 21 % jo imamo rezervirane za višje harmonske tokove. Tako nizko izrabo kompensacijske naprave bomo seveda redko predvideli, raje bomo izkoristili možnosti preobremenitve kompensacijskih kondenzatorjev. Kondenzatorje smo razdelili v dve v zvezdo vezani skupini zaradi lažjega nadzora in zaščite celotne naprave. Oba zvezdišča kondenzatorjev namreč povežemo preko tokovnega (napetostnega) transformatorja in nanj priključimo zaščitno napravo. To nam registrira tudi zelo majhne nesimetrije med obeh zvezdama, če pride do poškodb posameznih elementov kondenzatorjev.

LITERATURA

1. Leistungsfaktorbesserung durch Kondensatoren, W. Kafka, H. Reizuch, Siemens-Zeitschrift 5/1953
2. Verbesserung des Leistungsfaktors und Herabsetzung von Oberschwingungen durch Siebkreise, N. Hofmann; Elektrizitätswirtschaft 6/1957
3. Siebkreise zur Verbesserung des Leistungsfaktors bei Stromrichteranlagen, M. Hofmann; Siemens-Zeitschrift 4/1957
4. Oberschwingungen in Niederspannungsnetzen, F. Bieger; Siemens-Zeitschrift 8/1975
5. Vprašanje napetosti in kompenzacije v železarstvu, J. Bratina, Energetika u crnoj metalurgiji, Sisak 1971
6. Elektroenergetske instalacije v industriji, J. Bratina; Posvetovanje o električnih instalacijah, Radenci 1975

ZUSAMMENFASSUNG

Die Blindleistungkompensationsanlagen sind meistens als Kondensatorbatterien ausgelegt. Solange wir nur mit den Strömen der Netzfrequenz zu tun haben, verursacht uns der Einbau der Kondensatoren in ein elektroenergetisches System keine Schwierigkeiten. Wegen der generierten höheren harmonischen Ströme, welche von den derzeitigen Abnehmern wie Gleichrichteranlagen oder Lichtbogenöfen verursacht werden, kann für die Ströme aus der parallelen Bindung der Netzinduktivität und der Kondensatorenkapazität ein paralleler Schwingungskreis entstehen. Dieser verursacht eine Stärkung von den Abnehmern (oder aus dem Netz) eingedrückten höheren harmonischen Stromes einer Resonanzfrequenz sowohl im Netz wie durch die Kondensatorbatterie. Die Entstehung solcher ungünstiger Verhältnisse kann auf zwei Arten gelöst werden: mit einer Sperrdrossel, welche den höheren harmonischen Strömen den Weg durch die Kondensatorbatterie verhindert, oder mit einer Saugdrossel, welche einen Serienresonanzkreis für einen bestimmten höheren harmonischen Strom

bildet und für welchen der Widerstand dieses Kreises sehr klein ist.

In beiden Fällen wird vor die Kondensatorbatterie eine Drossel eingebaut, welche zugleich auch als Einschalt-drossel dient. Im ersten Fall ist die Drossel grösser und muss so dimensioniert sein, dass die hintereinander gebundene Induktivität der Drossel und Kondensatorkapazität für alle auftretenden höheren harmonischen Ströme der Verbraucher einen induktiven Widerstand bedeuten. So kann dieser resultierende Induktivwiderstand mit der Netzinduktivität keinen neuen parallelen Schwingungskreis bilden. Im Falle eines Saugkreises ist für dessen Resonanzfrequenz der Kreiswiderstand gleich Null; der gesamte höhere harmonische Strom dieser Frequenz wird deshalb in den Saugkreis einlaufen. Für Frequenzen die höher sind als die Resonanzfrequenz wird der Saugkreis ein Induktivwiderstand, in diesen Fällen wird der Saugkreis mit der Netzinduktivität nicht einen parallelen Schwingungskreis bilden können. Für Frequenzen die

niedriger sind als die Resonanzfrequenz wird der Saugkreis ein Kapazitätswiderstand, welcher unter bestimmten Bedingungen mit der Netzinduktivität einen neuen parallelen Schwingungskreis bilden wird. Dieser würde wieder eine Gefahr für die Stärkung der höheren harmonischen Ströme dieser neuen Resonanzfrequenz darstellen. Um diese Gefahren zu umgehen, werden die Saugkreise für Frequenzen gebaut, der Reihe nach wie sie auftreten: zuerst für 5, dann für 7 u. s. w. Unter bestimmten Bedin-

gungen kann ein Saugkreis auch für zwei benachbarte Frequenzen gebaut werden. Zum Beispiel Saugkreis für $n = 12$ für höhere harmonische Ströme mit $n = 11$ und 13.

Im Artikel sind die Beziehungen der einzelnen Parameter des elektroenergetischen Systemes analytisch dargestellt, so dass es bei dem Bau oder der Exploatierung der Kompensationsanlagen möglich ist mit den richtigen Eingriffen die Gefahren auszuweichen und der Kompensation eine volle Betriebsleistung zuzusichern.

SUMMARY

Reactive power is most often compensated by a bank of condensers of a certain capacity. Dealing with current of basic — line frequency, inserting condensers into electro-energetic system does not represent difficulties. Due to harmonic currents caused by consumers like rectifiers and electric arc furnaces, a parallel oscillating circuit with these currents appears in a parallel connection with the line conductivity and condenser capacity. This causes the increased harmonic current, imposed by consumers (or from the line), of a resonant frequency in the line and through the bank of condensers. Such unfavourable conditions can be solved in two ways: by a blocking choke which prevents harmonic current to flow through the bank of condensers, or by a suction choke which creates a serial resonant circuit for a certain harmonic current and for which the resistance of this circuit is very low. In both cases, simultaneously also a starting choke is built before the bank of condensers. In the first case, this choke is bigger and of such dimensions that the series of the choke capacity and of the condenser capacity represent an inductive resistance for all the harmonic currents of consumers. Thus the resulting inductive resistance cannot form an new parallel oscillating circuit with the

line inductivity. When a suction circuit is in question, the circuit resistance for its resonant frequency is zero: the total harmonic current of this frequency will flow into the suction circuit. In frequencies higher than the resonant one, the suction circuit will represent an inductive resistance, and in such a case the suction circuit will not create a parallel oscillating circuit with the line inductivity. In frequencies lower than the resonant one, the suction circuit will represent a capacitive resistance which could form a parallel oscillating circuit with the line inductivity in certain conditions. In order to avoid the new danger of the increased harmonic currents of the new resonant frequency, the suction circuits are constructed for the frequencies in the order of their appearance: at first for 5, then for 7, etc. In special conditions the suction circuit can be constructed also for the two neighbouring frequencies: e. g. the suction circuit for $n_s = 12$ for the harmonic currents with $n = 11$ and 13. The paper presents analytically and graphically relationships of single parameters in the electro-energetic system that the compensation can be prepared in the correct way and that it will function with a high efficiency.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устройства для компенсации реактивного (безваттного) тока обычно представляют собой батареи конденсаторов определенной емкости. Если речь идет только о токах основной сетевой частоты, тогда включение конденсаторов в электроэнергетические системы не связано с какими-либо затруднениями. Однако такими потребителями тока, какими теперь являются например выпрямительные устройства и электродуговые печи, генерируются токи высших гармоник. При параллельном подсоединении к сети конденсаторов индуктивность и емкость дают параллельный колебательный контур. При этом как в самой сети, так и в конденсаторной батарее токи гармоник, исходящие от потребителя (или от сети) усиливаются вследствие резонансного эффекта.

Из такого неблагоприятного положения выход можно найти двояким способом: или встроить заградительный дроссель, который воспрепятствует прохождению токов высших гармоник сквозь конденсаторную батарею, или же подсоединить поглощающий дроссель, который создаст последовательный резонансный контур для определенных гармоник при минимальном сопротивлении самого контура. В обоих случаях перед конденсаторной батареей подсоединяется дроссель, который в то же время выполняет и роль пускового дросселя.

В первом случае дроссель побольше. Он должен быть рассчитан так, чтобы связанные в последовательную цепь дроссель и конденсаторы образовали индуктивное сопротивление для всех появляющихся высших гармоник. Суммарное индуктивное сопротивление этого контура не может при этом привести к обра-

зованию нового параллельного колебательного контура совместно с сетевой индуктивностью.

Во втором случае (поглощающий контур) сопротивление контура при резонансной частоте равно нулю: ток гармоники резонансной частоты, следовательно, полностью поглощается поглощающим контуром. При наличии гармоник с высшей, в сравнении с резонансной, частотой поглощающий контур будет представлять собой индуктивное сопротивление, причем он не в состоянии образовать параллельный колебательный контур совместно с индуктивностью сети. А в случае появления частоты ниже резонансной поглощающий контур сыграет роль емкостного сопротивления, которое в определенных условиях образует совместно с индуктивностью сети новый параллельный колебательный контур. Последний может вызвать опасность усиления токов высших гармоник этой новой резонансной частоты. С целью избежать такой опасности поглощающие контуры встраиваются из расчета на появляющиеся частоты в порядке их появления: сначала для 5-й, затем для семикратных и т. д. Для определенных конкретных условий поглощающий контур можно встраивать и для двух соседних гармоник, например для $n = 11$ и 13 при $n_s = 12$.

Взаимозависимость отдельных параметров электроэнергетической системы в статье иллюстрируется аналитически и графоаналитически. При производстве и использовании компенсационных устройств можно на этой основе избежать опасности и обеспечить полный эффект компенсации.