

1 Kompenzacijske naprave

Kompenzacijske naprave v splošnem delimo na pasivne in aktivne. Pasivne temeljijo na reaktivnih elementih (kondenzatorji in dušilke), aktivne pa na polprevodniških stikalnih elementih.

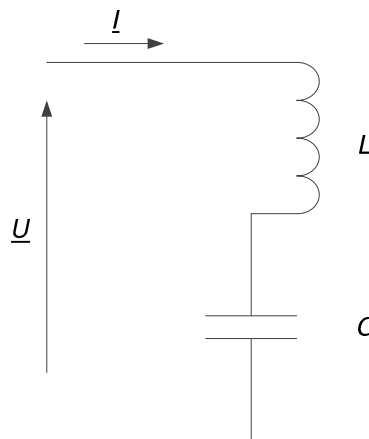
1.1 Pasivne kompenzacijske naprave

V tem poglavju bodo predstavljeni pasivni kompenzatorji jalove moči, ki temeljijo na kondenzatorskih baterijah. Pasivni kompenzator sestavlja poleg kondenzatorja še zaporedno vezana dušilka. V nadaljevanju bo predstavljen splošni izračun elementov kompenzatorja, sledil pa bo izračun elementov kompenzatorja. Opisana bo tudi problematika nastanka paralelne in serijske resonance v elektroenergetskih omrežjih.

1.1.1 Osnovni izračun elementov kompenzatorja

Pasivni kompenzator jalove moči tvorijo kondenzator kapacitivnosti C in dušilka z induktivnostjo L . Dušilka služi omejevanju vklopnih tokov kondenzatorja, v primeru uglasitve L - C člena na določeno harmonsko frekvenco pa lahko kompenzator, poleg funkcije zagotavljanja kapacitivne jalove moči, služi filtriranju tokovnih harmonskih komponent ali pa popravljanju frekvenčne karakteristike omrežja.

Na sliki 1 je prikazana osnovna shema pasivnega kompenzatorja, pri čemer smo zanemarili ohmske izgube vezja. Pri izračunih bomo operirali s faznimi vrednostmi veličin.

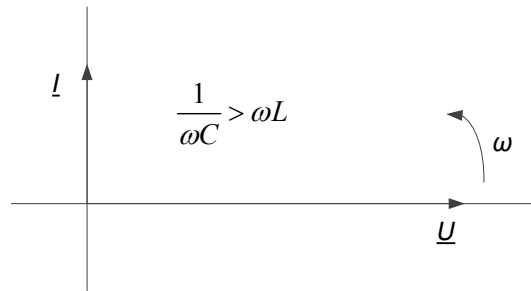


Slika 1: Osnovna shema pasivnega kompenzatorja.

Celotno impedanco in tok kompenzatorja na sliki 1 lahko zapišemo z izrazom (1.1).

$$\underline{Z} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$
$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{-j\underline{U}}{\omega L - \frac{1}{\omega C}} \quad (1.1)$$

Kazalčni diagram toka in napetosti kompenzatorja prikazuje slika 2. Pri tem smo predpostavili, da je reaktanca kondenzatorja večja od reaktance dušilke. Sinhronska kotna hitrost ω označuje smer vrtenja kazalcev.

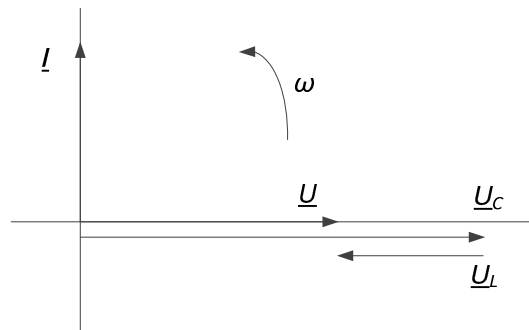


Slika 2: Kazalčni diagram pasivnega kompenzatorja.

Napetost na kompenzatorju U lahko zapišemo kot vsoto napetosti na kondenzatorju in napetosti na dušilki (enačba (1.2)).

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_L + \underline{U}_C \\ \underline{U}_L &= j\omega L \underline{I} \\ \underline{U}_C &= \frac{\underline{I}}{j\omega C} = \frac{-j\underline{I}}{\omega C} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Napetosti na dušilki in na kondenzatorju imata torej nasproten predznak, njuna vsota pa je enaka napetosti na priključnih sponkah kompenzatorja U . Razmere prikazuje kazalčni diagram na sliki 3. Napetost na kondenzatorju je zaradi dušilke večja od napetosti na priključnih sponkah kompenzatorja.



Slika 3: Kazalčni diagram napetosti kompenzatorja.

Razmerje med napetostjo na kondenzatorju in napetostjo na priključnih sponkah ter razmerje med napetostjo na dušilki in napetostjo na priključnih sponkah podaja naslednji izraz.

$$\begin{aligned} \frac{\underline{U}_C}{\underline{U}} &= \frac{\underline{I}}{j\omega C} \frac{1}{\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right)\underline{I}} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \\ \frac{\underline{U}_L}{\underline{U}} &= j\omega L \frac{1}{\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right)\underline{I}} = \frac{-\omega^2 LC}{1 - \omega^2 LC} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Navidezno moč kompenzatorja nam podaja izraz (1.4).

$$\underline{S}_k = \underline{U} \underline{I}^* = \underline{U} \frac{(-j\underline{U})^*}{\omega L - \frac{1}{\omega C}} = \frac{jU^2}{\omega L - \frac{1}{\omega C}} = j \frac{U^2 \omega C}{\omega^2 LC - 1} = jQ_k \quad (1.4)$$

Moč kondenzatorja v opisanem vezju pa je podana z izrazom (1.5).

$$\underline{S}_c = \underline{U}_c \underline{I}^* = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \underline{U} \underline{I}^* \quad (1.5)$$

Iz izraza (1.5) sledi, da je moč kondenzatorja v serijski vezavi z dušilko večja kot moč celotnega kompenzatorja.

Povečanje moči oz. povišano napetost na kondenzatorju lahko izrazimo s faktorjem p , ki ga podajajo naslednje relacije (pri tem je ω sinhronska kotna hitrost, f_r pa resonančna frekvenca L - C člena):

$$\begin{aligned} p = \omega^2 LC &\Rightarrow \frac{\omega^2}{p} = \frac{1}{LC} \\ 2\pi f_r = \omega_r &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow \omega_r^2 = \frac{1}{LC} \\ p &= \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Pasivni kompenzator bomo pri računanju frekvenčnih karakteristik in v simulacijskem programu modelirali kot R - L - C člen. Pri dimenzioniranju elementov filterških kompenzatorjev moramo torej upoštevati vpliv dušilke na celotno nazivno moč kompenzatorja. V ta namen smo vpeljali faktor p , ki predstavlja pu razliko med močjo kompenzatorja s filterško dušilko in močjo kompenzatorja brez nje. Izračunamo ga po enačbi (1.7) in je za dano resonančno frekvenco (f_r) konstanten.

$$p = \omega^2 LC = \omega^2 \frac{1}{(2\pi f_r)^2} \quad (1.7)$$

kjer je $\omega = 2\pi 50$.

Potrebno kapacitivnost kondenzatorja (kapacitivna jalova moč kompenzatorja Q_k pri nazivni napetosti U_n) torej izračunamo:

$$C = \frac{Q_k(1-p)}{U_n^2 \cdot \omega} \quad (1.8)$$

Izračunana kapacitivnost velja za vezavo zvezda, za vezavo delta je vrednost trikrat manjša. Induktivnost filterške dušilke izračunamo:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C} \quad (1.9)$$

Ohmsko komponento kompenzacijske stopnje določimo na osnovi kapacitivnosti in induktivnosti elementov kompenzatorja:

$$R = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot 4000} + \frac{\omega \cdot L}{10} \quad (1.10)$$

Za ohmski del impedance je privzeto naslednje razmerje:

- induktivni del: $R_L / X_L = 1/10$
- kapacitivni del: $R_C / X_C = 1/4000$

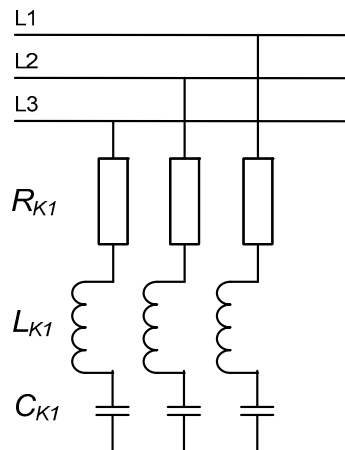
Z uporabo istih formul izračunamo tudi elemente kompenzatorja brez filtrske dušilke, torej samo z vklopno dušilko. Ker je faktor p v takem primeru majhen, lahko privzamemo $p = 0$.

1.1.1.1 Primer izračuna elementov kompenzatorja

Za izračun elementov kompenzatorja smo uporabili naslednje osnovne podatke:

$$\begin{aligned} Q_{K1} &= 2,4 \text{ MVar} \\ p &= 0,07 \Rightarrow f_r = 189 \text{ Hz} \\ U_n &= 20 \text{ kV} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Osnovno shemo kompenzatorja prikazuje slika 4:



Slika 4: Elementi kompenzatorja, vezava kondenzatorjev v zvezdo.

Elemente kompenzatorja izračunamo s pomočjo enačb iz prejšnjega razdelka. Izračunane so fazne vrednosti elementov pri vezavi kondenzatorjev v zvezdo:

$$\begin{aligned} R_{K1} &= 1,3 \Omega \\ X_{K1} &= 12,54 \Omega \Rightarrow L_{K1} = 39,9 \text{ mH} \\ C_{K1} &= 17,762 \mu\text{F} \end{aligned} \quad (1.12)$$

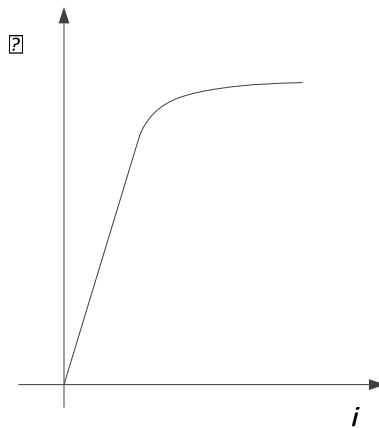
Amplituda fазne napetosti na kondenzatorju pa bo znašala:

$$U_c = \frac{1}{\sqrt{3}} U_n \frac{1}{1-p} = 12,42 \text{ kV} \quad (1.13)$$

1.1.1.2 Izvedba dušilke

Dušilke so na splošno lahko izvedene z feromagnetnim (železnim) jedrom ali pa brez jedra (t.i. zračne dušilke). Ker ima železo veliko večjo permeabilnost kot zrak, je za isto induktivnost potrebna manjša dušilka kot v primeru zračne izvedbe. Zaradi železnega jedra ima dušilka nelinearno karakteristiko magnetenja. Kot tok dušilke i (oz. magnetna poljska jakost H) preseže določeno vrednost, magnetni fluks ϕ (oz. gostota magnetnega polja B) skoraj ne narašča več (slika 5).

Posledice nelinearne magnetilne karakteristike so izgube in generiranje tokovnih harmonikov. Ob izbiri ustreznega materiala in ob ustrezni izvedbi ter dimenzioniranju feromagnetnega jedra, je mogoče doseči relativno linearno delovanje dušilke z majhnimi izgubami in harmonskim popačenjem.



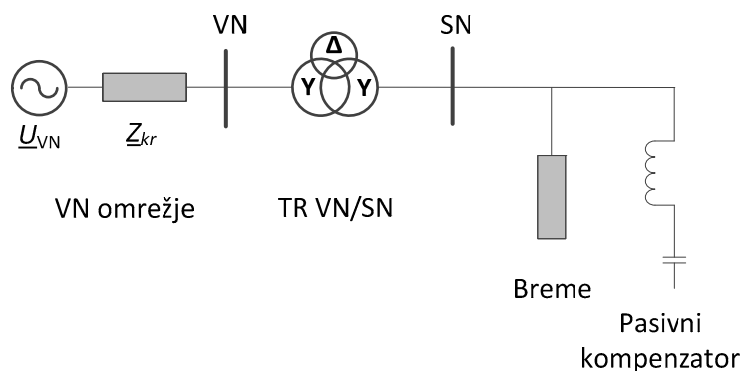
Slika 5: Nelinearna karakteristika magnetenja.

1.1.2 Pojav resonance v elektroenergetskih omrežjih

Vsa električna vezja, ki vsebujejo člene z induktivnim in kapacitivnim karakterjem, imajo eno ali več resonančnih frekvenc. Pri resonančni frekvenci lahko doseže impedanca sistema zelo visoke ali zelo nizke vrednosti, kar povzroči ojačanje tokovnih in napetostnih harmonskih komponent. Če ima npr. omrežje v bližini harmonske frekvence ω_h visoko impedanco, lahko že majhna harmonska komponenta bremenskega toka pri tej frekvenci povzroči visoko harmonsko komponento napetosti. Podobno velja za napetost. V kolikor je impedanca pri ω_h nizka, lahko že majhna harmonska komponenta omrežne napetosti povzroči velik harmonski tok. Možne problematične točke sistema lahko določimo z izračunom impedančne frekvenčne karakteristike sistema. Impedančna frekvenčna karakteristika podaja frekvenčno odvisnost impedance obravnavanega omrežja, ki jo lahko določimo z omrežne ali z bremenske strani. Pri vzporedni ali zaporedni vezavi kondenzatorja C in dušilke L je resonančna frekvenca vezja določena z naslednjim izrazom:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (1.14)$$

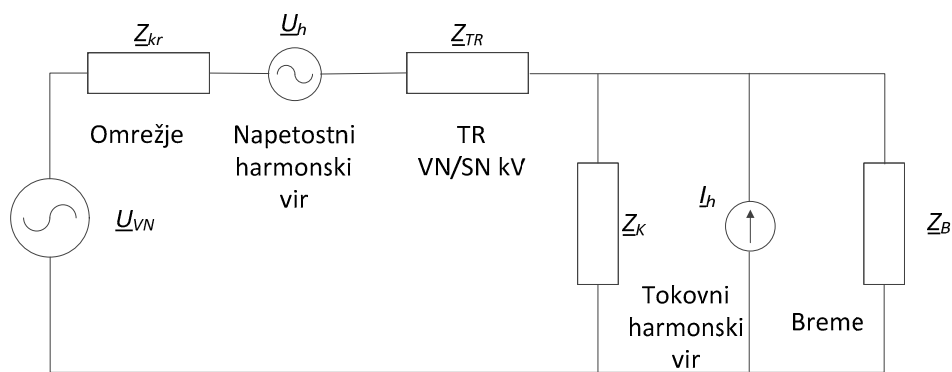
Pojav resonance in izračun impedančne frekvenčne karakteristike bomo predstavili na hipotetičnem primeru omrežja, ki je prikazano na sliki 6. Gre za splošno omrežje industrijskega porabnika, ki je preko transformatorja VN/SN priključen na prenosno omrežje na VN nivoju. Na porabniški strani sta priključena breme in pasivni kondenzatorski kompenzator za kompenzacijo jalove moči.



Slika 6: Primer omrežja – analiza resonančnih razmer.

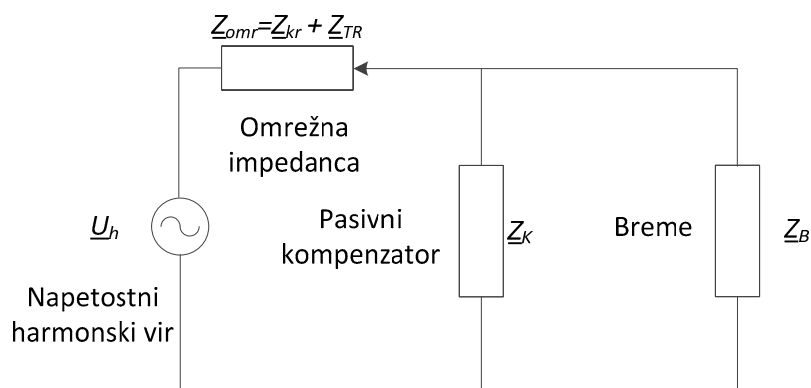
Prenosno omrežje lahko predstavimo kot togi napetostni vir (\underline{U}_{VN}) z zaporedno vezano kratkostično impedanco \underline{Z}_{kr} . Tudi transformator bomo ponazorili z impedanco oblike $\underline{Z}=R+jX$. Kapacitivnosti omrežja (npr. dozemne kapacitivnosti vodov) smo pri tem zanemarili, saj ima omrežje pretežno induktivni značaj. Pri kratkostični impedanci in pri impedanci transformatorja bomo privzeli razmerje $R/X = 0,1$. Breme bomo modelirali kot $L-R$ člen, pasivni kompenzator pa kot $R-L-C$ člen. Pri kompenzatorju sta v splošnem možni dve možni izvedbi. Prva je klasični kompenzator, pri katerem serijska dušilka služi za omejevanje vklopnih tokov. Drugi pa je filterski kompenzator, pri katerem je $L-C$ člen uglasen na določeno frekvenco in poleg kompenzacije jalove moči služi še filtriranju izbranih harmonskih komponent bremenskega toka ali pa popravljanju frekvenčne karakteristike omrežja.

Nadomestno vezje obravnavanega sistema je prikazano na sliki 7. V vezje smo dodali še dva vira: harmonski napetostni vir na omrežno stran in harmonski tokovni vir na bremensko stran. S harmonskima viroma ponazorimo harmonsko popačenje omrežne napetosti in bremenskega toka. Vse impedance morajo biti preračunane na skupni napetostni nivo.

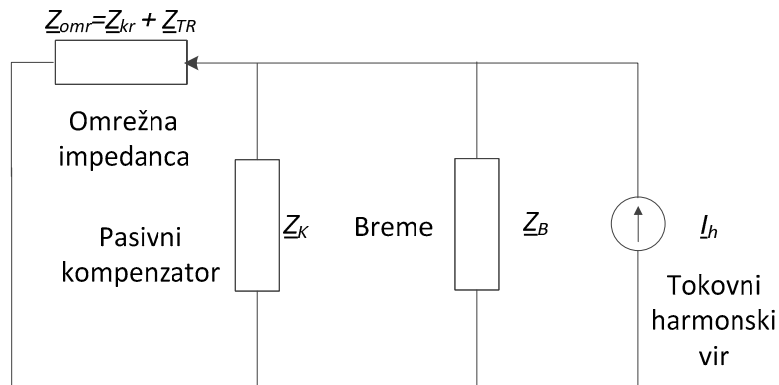


Slika 7: Nadomestna shema obravnavanega omrežja.

Frekvenčna impedančna karakteristika podaja odvisnost impedance sistema od frekvence. Impedanco sistema lahko določimo s strani napetostnega harmonskega vira na omrežni strani in s strani tokovnega harmonskega vira na bremenski strani. Gledano z omrežne strani nas namreč zanima, kakšne harmonske tokove lahko povzročijo harmoniki prisotni v omrežni napetosti. Z bremenske strani je situacija dualna, zanima nas, kakšne harmonske napetosti lahko povzročijo harmonski tokovi, ki jih proizvaja breme. Nadomestno vezje za oba primera prikazujeta sliki 8 in 9, pri čemer smo impedanco omrežja in transformatorja ponazorili z nadomestno impedanco \underline{Z}_{omr} .



Slika 8: Nadomestna shema obravnavanega omrežja z omrežne strani.



Slika 9: Nadomestna shema obravnavanega omrežja z bremenske strani.

Za določitev impedančne frekvenčne karakteristike moramo seveda upoštevati frekvenčno odvisnost impedanc. Tako impedanca dušilke, kot tudi impedanca kondenzatorja sta frekvenčno odvisni:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

(1.15)

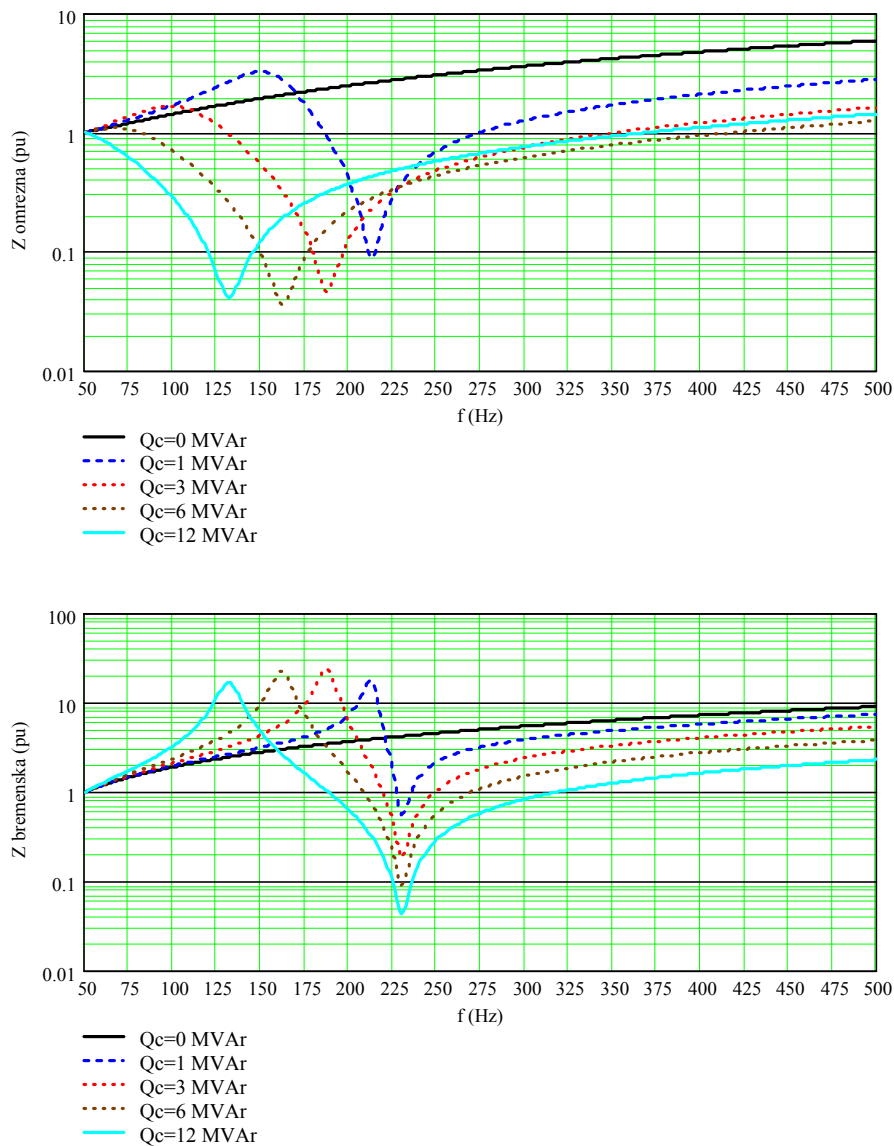
Pri impedanci z omrežne strani nas zanimajo točke, kjer impedanca doseže nizke vrednosti (serijska resonanca) in lahko majhna harmonska napetost povzroči velik harmonski tok. Pri impedanci z bremenske strani pa nas zanimajo točke, kjer impedanca doseže visoke vrednosti (paralelna resonanca) in lahko majhen harmonski tok bremena povzroči veliko harmonsko napetost. Najbolj so seveda problematične resonančne točke, ki se nahajajo v bližini značilnih harmonikov, ki so prisotni v določenem omrežju.

Za ohmsko upornost pa lahko v večini sistemov predpostavimo, da se tam nekje do desetega harmonika ne spreminja bistveno. Pri daljnovodih in kablji se ohmska upornost spreminja s kvadratom frekvence, vendar šele potem, ko postane kožni efekt opaznejši, t.j. pri višjih frekvencah. Razmere so nekoliko drugačne pri transformatorjih, kjer se zaradi vrtilnih izgub v navitjih upornost spreminja skoraj linearno s frekvenco. Kljub vsemu upoštevanje konstantne ohmske upornosti ne vpliva bistveno na točnost rezultatov.

V nadaljevanju bodo prikazane frekvenčne karakteristike nadomestne impedance obravnavanega hipotetičnega sistema z omrežne ($Z_{omrežna}$) in z bremenske strani ($Z_{bremenska}$). V obeh primerih bodo prikazane relativne vrednosti impedance glede na vrednost impedance pri 50 Hz v odvisnosti od frekvence. Na vsakem grafu bodo prikazane karakteristike za različne moči kompenzatorja (Q_C) in za sistem brez kompenzacije ($Q_C = 0$). Kratkostična moč mreže je 800 MVA (na 110 kV), moč transformatorja je 20 MVA ($u_k = 15\%$), pri bremenu smo privzeli moči $P = 8$ MW in $Q = 5$ MVA. Slika 10 prikazuje karakteristiki za zaporno filtrsko izvedbo kompenzatorja z resonančno frekvenco pod petim harmonikom ($f_R = 230$ Hz).

Glede na opisano problematiko resonance in glede na rezultate izračunov lahko strnemo nekaj ugotovitev. Pri sistemih z induktivnimi in kapacitivnimi elementi vedno nastopijo resonančne frekvence. Problematične so zlasti resonance, ki nastopijo v bližini značilnih harmonskih komponent in lahko povzročijo znatno ojačenje tokovnih oz. napetostnih harmonikov. Pojav je zlasti opazen pri vgrajenih kondenzatorjih za kompenzacijo jalove moči. Resonančna frekvenca sistema praviloma pada z večanjem moči kompenzatorja in z nižanjem resonančne frekvence uglašene (t.j. filterskega) kompenzatorja. Medtem ko so resonančne frekvence odvisne od induktivnosti in kapacitivnosti v sistemu, je sama velikost impedance pri resonanci odvisna od ohmske komponente elementov sistema.

Pri izvedbi kompenzatorjev s filtrsko dušilko lahko opazimo še naslednje. Iz slike 10 lahko na primer vidimo, da ima uglasitev filtra na frekvenco 230 Hz za posledico pojav paralelne resonance nekje pod frekvenco kompenzatorja. Pri vgradnji filtrskih kompenzatorjev v omrežje moramo zato paziti, da je ta frekvenca dovolj daleč od pomembnejših harmonikov, ki so prisotni v sistemu. Zato so zaporni filtri navadno preračunani na frekvenco, ki je nekoliko nižja od frekvence značilnega harmonika. S tem zagotovimo nekoliko večjo varnost v primeru spremembe parametrov filtra (npr. sprememba kapacitivnosti ali induktivnosti zaradi temperature ali napake) ali spremembe parametrov omrežja (npr. zamenjava transformatorja ali sprememba kratkostične moči). V nasprotnem primeru bi se lahko paralelna resonanca premaknila v območje harmonika, kar bi lahko pripeljalo do še slabše situacije kot brez uporabe filtra.



Slika 10: Frekvenčna karakteristika impedance hipotetičnega omrežja z omrežne in z bremenske strani

1.1.2.1 Osnovne enačbe za izračun impedanc sistema

Kompensator:

$$\begin{aligned}C_k &= \frac{Q_k(1-p)}{U_n^2 \cdot \omega} \\L_k &= \frac{1}{(2\pi f_R)^2 C_k} \\R_k &= \frac{1}{\omega \cdot C_k \cdot 4000} + \frac{\omega \cdot L_k}{10}\end{aligned}\tag{1.16}$$

Toga mreža:

$$\begin{aligned}L_{tm} &= \frac{U_{tm}^2}{S_k''} \cdot \frac{1}{\omega} \\R_{tm} &= \frac{\omega \cdot L_{tm}}{10}\end{aligned}\tag{1.17}$$

Transformator:

$$\begin{aligned}L_{tr} &= \frac{U_{tr}^2}{S_{tr}} u_k \cdot \frac{1}{\omega} \\R_{tm} &= \frac{\omega \cdot L_{tr}}{20}\end{aligned}\tag{1.18}$$

Nadomestno breme:

$$Z_{br} = \left(\frac{U_{br}^2}{P_{br} + jQ_{br}} \right)^*\tag{1.19}$$