

GOJKO DOTLIĆ

ELEKTROENERGETIKA

KROZ STANDARDE, ZAKONE I PRAVILNIKE

I TEHNIČKE PREPORUKE

(TUMAČENJA, KOMENTARI, PRIMERI)

SMEITS

1998

2.6. Elektromotorni pogoni

2.6.1. Izvori treperenja usled fluktuacije napona

U opštem slučaju, treperenje usled fluktuacije napona može imati svoje izvoriste u sistemu snage (kratki spojevi i prenaponi usled prekidanja), ali najčešće u opremi koja je priključena na taj sistem, i to:

- generatorska oprema (napojne mašine, generatori, sistemi pobude);
- ostala oprema (puštanje motora u rad, motori koji se povremeno opterećuju, motori koji pokreću povremena opterećenja, električne peći, aparati za električno zavarivanje, električni bageri, teški valjaonički stanovi i slične instalacije).

Sa stanovišta projektovanja električnih instalacija niskog napona, odnosno elektromotornih pogona, najčešći su izvori treperenja usled puštanja motora u rad.

Elektromotorni pogoni napajaju se iz električnih mreža standardnih napona (JUS N.A2.001:1989). Najčešće se primenjuju naponi 230 V jednofazno i 380 V, 500 V, 660 V, 3000 V, 6000 V i 10000 V trofazno. Sinhroni i asinhroni motori napajaju se najčešće direktno iz mreže. *Pravilnik o tehničkim normativima za električne instalacije niskog napona* ("Sl. list SFRJ", br. 53/1988. i 54/1988), za direktno napajanje motora naizmenične struje sa kratkospojenim rotorom iz distributivne mreže napona 0,4 kV, uslovljava da pad napona pri pokretanju ne sme premašiti vrednost pri kojoj dolazi do smanjenja momenta motora tako da ugrožava pouzdan zalet motora i radne mašine ili utiče na stabilan rad ostalih potrošača vezanih na istu mrežu. Zbog cene, stepena korisnog dejstva i sigurnosti, motori za opštu komercijalnu upotrebu zahtevaju struju pri puštanju u rad nekoliko puta veću od struje pri punom opterećenju da bi dobili dovoljan polazni momenat. Iz tih razloga većina treperenja prouzrokuje se puštanjem motora u rad.

Na primer, prema tehničkim propisima i preporukama Elektrodistribucije Beograd (EDB 134:1984), da pri pokretanju motora ne bi došlo do treperenja napona u mreži, uslovljava se da se, u zavisnosti od snage, koriste motori sa sledećim načinom pokretanja:

- monofazni motori za naizmeničnu struju sa direktnim pokretanjem, nazivne snage do 1,5 kW;
- trofazni motori za naizmeničnu struju sa normalnom učestalošću uključivanja (do 20 puta dnevno):
 - sa direktnim pokretanjem, nazivne snage do 5,5 kW;
 - sa pokretačima zvezda–trougao, nazivne snage do 11 kW;
 - sa centrifugalnim pokretačem ili sličnim uređajem, uz koje polazna struja ne prelazi dvostruku nazivnu vrednost, nazivne snage do 15 kW.

2.6.2. Mesta na kojima fluktuacije napona izazivaju treperenje i mere za smanjivanje treperenja

Mesto gde dolazi do fluktuacije napona, ili prostranstvo oblasti koja je pod uticajem, ima znatnu ulogu pri određivanju mera za otklanjanje nepoželjnih posledica te pojave. Ako su to u pitanju sabirnice generatora, obično ne postoje komercijalno praktična sredstva za popravljjanje situacije u sistemu snage, te se korekture moraju vršiti u mestu upotrebe. Kod trafostanica, pod uslovom da do iste pojave nije došlo i na sabirnicama elektrane, mogu se koristiti posebni vodovi ili prenos sa višim naponima za napajanje ugroženih oblasti, ili pak upotrebiti direktni vodovi od sabirnica generatora do oblasti koja je pod uticajem. Ponekada sama oprema može da se dotera da manje utiče na fluktuaciju napona. Ako se radi o napojnim vodovima, popravke se mogu izvesti bilo u sistemu snage, ili na upotrebljenim uređajima koji troše električnu energiju. Ako je pak u pitanju samo sistem distribucije, korekcije se mogu vršiti bilo u sistemu, ili priključenim uređajima. Ako priključeni uređaj predstavlja standardnu opremu, obično je najbolje izvesti korekcije distribucionog sistema i tako poboljšati

uslove za sve ostale uređaje priključene na taj sistem. Ako je priključeni uređaj specijalan, tada je verovatno efikasnije vršiti korekciju tog uređaja.

Veliki je broj razne opreme za korekciju i postupaka za smanjivanje treperenja. Mere za smanjivanje treperenja zavise od mesta gde dolazi do fluktuacija napona. Najčešće se razmatraju:

1. Motor-generator grupe. Upotreba ovog sredstva za smanjivanje treperenja je najskuplje rešenje, najteže, najmanjeg stepena korisnog dejstva i zauzima više prostora nego bilo koje drugo sredstvo koje dolazi za upotrebu. Motor-generator grupa ima tu prednost da je to potpuno standardan i vrlo pouzdan uređaj. Motor može da bude sinhroni, indukcioni sa veveričinim kavezom ili namotani indukcionim motor, s tim da uz poslednji obično dolazi zamajac i regulator klizanja. Generator koji može biti jednofazni ili trofazni, pogodan je za napajanje bilo jednofaznih, ili višefaznih opterećenja. Čak i kada je generator jednofazni, uobičajeno je da se upotrebljava trofazni namotaj statora, spregnut u zvezdu kod koga su dve grane redno vezane, a treća faza je namotana za eventualnu buduću upotrebu. Kada je priključeno više od jednog aparata koji izazivaju treperenja, mora se rešiti da li uzeti jednu grupu, ili svaki aparat posebno.

2. Pretvarači faza. U industrijskim postrojenjima veliki procenat mogućih uzroka treperenja su jednofazni uređaji. Da bi se to sprečilo, potrebno je izvesno akumuliranje energije. Ovo akumuliranje se može izvesti sa statičkim uređajima kao što su induktivni namotaji ili kondenzatori, ili rotaciona oprema sa mehaničkom inercijom. Pretvarači faza, kao vrsta, nisu posebno pogodni za eliminisanje treperenja izuzev možda u graničnim slučajevima gde se traži samo skromno poboljšanje stanja (smanjenje pada napona za oko jednu polovinu). U ovakvom slučaju oni mogu biti najjeftinije i najefikasnije sredstvo za otklanjanje treperenja.

3. Sinhroni kompenzatori. Pad napona u sistemu snage koji nastaje usled naglog (priključenja) opterećenja jednak je vektorskom proizvodu struje i impedanse sistema koji pravilno određuje položaje vektora. Prema tome, jedan način za smanjivanje treperenja je smanjivanje impedanse sistema. S obzirom da je u ukupnom padu napona pretežna reaktivna komponenta, došlo se do predloga upotrebe sinhronih kompenzatora u paralelnom radu sa sistemom kao sredstvom za smanjivanje reaktanse sistema i prema tome poboljšanja uslova treperenja. Ovaj metod, mada je ostvarljiv u principu, nije obično ekonomičan u praksi. Kod većih jedinica i gde su drugi uslovi pogodni, celokupna ekonomika može opravdati upotrebu sinhronih kompenzatora velike brzine za vodoničnim hlađenjem i malom reaktansom. Učinjena je sugestija da se upotrebi pogonski motor za sinhroni kompenzator, s tim da mu se što više smanji subtranzijentna i tranzijentna reaktansa. Jedan od načina za smanjenje reaktanse sinhronih kompenzatora je redno vezivanje kondenzatora sa izvodima mašine.

4. Redni kondenzatori. Postoje dve osnovne upotrebe rednih kondenzatora, zavisno od toga da li popravljaju induktansu napojne strane ili opterećenja. Prema tome, koriste se: (1) redni kondenzatori priključeni u vod, i (2) kondenzatori redno vezani sa opremom. Budući da su redno vezani sa celim kolom snage, redni kondenzatori proizvode kapacitivnu snagu proporcionalnu kvadratu struje, te se tako poboljšava i faktor snage ($\cos \varphi$).

5. Otočni kondenzatori. Otočni kondenzatori priključeni na opremu tako da se mogu uključivati u skladu sa opterećenjem, smanjuju pad napona. Da bi bila efikasna, oprema koja se koristi mora uzimati konstantnu struju koja ima stalan faktor snage ($\cos \varphi$) za vreme perioda uključivanja, kao na primer izvesne vrste aparata za elektrolučno zavarivanje kod kojih se veća varenja izvode bez promene podešenosti u početku. Puštanje motora u rad je jedan primer primene kod koje otočni kondenzatori ne mogu biti efikasno korišćeni u pogledu smanjivanja treperenja. Udarne struje motora je oko šest puta veća od struje pri punom opterećenju. Ako se ovo neutrališe otočnim kondenzatorom, početni pad napona se jako smanjuje. Međutim, kada se motor ubrza, napon poraste iznad početnog napona.

6. Regulatori napona. Korišćenje regulatora napona je više teoretsko pitanje, jer ovi uređaji rade samo kada se napon menja. Prema tome postoji vremensko zaostajanje pre nego što se uspostavi normalan napon. Mislilo se da statički regulatori i budilice mogu eliminisati ovu teškoću i sprečiti padove napona. Međutim, vremenska konstanta pobude generatora, čini korekciju na ovaj način manje efikasnom.

7. Transformatori za poboljšanje naponskih prilika. Transformatori za poboljšanje naponskih prilika ili kompenzacioni transformatori rade tako da struja koju uzima opterećenje koje proizvodi treperenje prolazi kroz granu otpornosti i reaktanse, a pad napona koji se tada stvara dodaje se naponu za osvetljenje pomoću rednog transformatora. Pravilnim izborom otpornosti reaktanse i prenosnog odnosa rednog transformatora, treperenje u kolu osvetljenja može se gotovo sasvim eliminisati. Uprkos tehničke jednostavnosti ove šeme, kompenzacioni transformatori imaju praktična i tehnička ograničenja. Cena kompenzacionog transformatora je prilično visoka, pošto ta vrsta opreme nije standardizovana.

8. Uredaji za puštanje motora u rad. Kao što je ranije pomenuto, većina motora može se direktno puštati u rad, jer su i veće jedinice obično napajane sa vodova većeg kapaciteta u poređenju sa veličinom motora. Gde ovo nije slučaj, ako je puštanje u rad često, može da se zahteva uređaj za puštanje u rad. Teško je generalno izložiti pitanje puštanja motora u rad, pošto individualni slučajevi variraju sa veličinom motora, tipom, kao i početnim momentom motora i opterećenja.

9. Kontrola pobude. Ovo obuhvata jednostepeno povećanje pobude sinhronih motora pomoću prekidača koji se komanduju od strane opreme koja izaziva treperenje. Uopšteno uzevši, ovaj metod je neefikasan za eliminisanje treperenja izazvanog naglim padovima napona, ali može znatno smanjiti širinu opsega regulacije napona koji uznemiruje elektroprivredu pošto izaziva odveć čest rad regulatora napona napojnih vodova jer oni nastoje da dokompenziraju treperenje napona. Takve oscilacije izazivaju valjaonice kontinualnih pruga, veliki električni bageri itd., gde su varijacije opterećenja velike, ali gde je prirast opterećenja ili smanjenja tereta relativno skroman (npr. 10 do 30% u sekundi).

10. Kontrola i regulacija opterećenja. U nekim slučajevima je moguće smanjiti treperenje sijalica pomoću kontrole proizvodnog procesa. Na primer, u postrojenju gde rade dva ili tri aparata za zavarivanje, moguće je izvesti takav način blokiranja rada aparata da u isto vreme radi samo jedan aparat. Isto tako je moguće obavljati poslove koji izazivaju treperenje u vreme kada je opterećenje usled osvetljenja malo.

11. Zamajci. Ovaj metod ima značajnu vrednost za mehanička opterećenja, koja imaju kratko trajanje i duga vremena isključenja, kao što su aparati za sečenje limova, prese za isecanje itd.

12. Promene sistema. U praktičnim slučajevima treperenja izazvanog upotrebljenom opremom, postoji direktna zavisnost između iznosa treperenja i veličine sistema za napajanje. Na primer, uzmimo da aparat za zavarivanje izaziva treperenje koje odgovara 3% fluktuaciji napona u podstanici za napajanje široke potrošnje, a da je dozvoljena promena napona od samo jednog procenta. Utrostručenje snage napajanja podstanice smanjilo bi treperenje na traženi nivo te bi ovo predstavljalo jedan način za eliminisanje treperenja. Jedna od ekonomičnijih promena sistema je način napajanja podstanica sa dva ili više napojnih vodova od elektrana, paralelno priključenih na sabirnice. Drugi metodi za rešavanje problema smanjivanja treperenja obuhvataju menjanje napona napojnih vodova, postavljanje izvoda blizu visokog napona, vodovi veće propusne moći, dodavanje novih kapaciteta transformatora ili postavljanje posebnih vodova za opterećenja koja prouzrokuju treperenje. Lokalni uslovi određuju koja su sredstva za smanjivanja treperenja najpogodnija u posebnom slučaju. Katkada je proširenje sistema opravdano ukoliko bi kasnije bilo potrebno povećanje snage sistema.

2.6.3. Maksimalno dozvoljene fluktuacije napona

Ciklično treperenje, kada se primećuje, verovatno je neprijatno i smeta u najmanju ruku nekim osobama. Usamljeni padovi napona, čak i kada se jasno primećuju, ne smetaju većini osoba ukoliko nisu prilično učestani. Zato se može očekivati da su veće varijacije dozvoljene pre za neciklične nego za ciklične varijacije, a iznos dozvoljenog pada napona zavisi od učestanosti događanja i vrste pogona. Ovde je ponovo rasuđivanje jedan važan faktor isto toliko koliko i tehnički faktori. Maksimalno dozvoljene fluktuacije koje se praktikuju prikazane su u tabeli 2.55.

Definicije retke, česte, vrlo česte i izuzetno česte fluktuacije napona su:

1. Retko treperenje obuhvata slučajeve koji se događaju 6 puta ili manje u 24 časa, ali ne manje nego jedanput između 6 h i 24 h. Ove granice su namenjene za aparate kao što su motor-generatori, ventilatori, pumpe itd., koji normalno rade kontinualno tokom celog radnog dana.

2. Česta treperenja treba da obuhvate slučajeve koji se ne dešavaju češće nego tri puta na sat, izuzev između 6 h i 24 h kada ne treba da se dešavaju više nego jedanput na sat. Ovo je namenjeno za aparate kao što su mašine alatke, električne peći itd., koji se periodično puštaju ili zaustavljaju tokom radnog dana.

*Tabela 2.55. Maksimalne dozvoljene fluktuacije napona na bazi napona od 230 V
(Ovo je vrlo detaljan skup ANSI standarda koji se pokazao zadovoljavajućim u praksi)*

Vrsta pogona	Retko (V)	Često (V)	Vrlo često (V)	Izuzetno često (V)
A. *) Sabirnice podstanice sa kojih se napajaju samo vodovi za napajanje konzuma	12	8	6	6
B. *) Vod na napojnoj strani, čija se cela snaga ne daje jednom potrošaču	16	12	8	8
C. Vod čija se cela snaga apsorbuje od strane jednog potrošača	Nema određenih granica			
D. Sabirnice podstanice sa kojih se napaja kolo distribucije	12	6**)	4	4
E. Sekundarno distribuciono kolo				
a) potrošač koji prouzrokuje fluktuaciju na sekundarnoj strani	12	12	8	6
b) potrošač koji ne prouzrokuje fluktuaciju na sekundarnoj strani	12	10**)	6**)	4
NAPOMENE: *) Zatvorni vodovi ili sabirnice u koje se one mogu automatski preobratiti treba smatrati za vodove distribucije. **) Na seoskim vodovima ova granica je izvedena do 12 V, pošto je puštanje motora u rad obično u doba dnevnih časova. Ova granica nam omogućava da obuhvatimo duže distance.				

3. Vrlo često treperenje bi obuhvatalo slučajeve koji se dešavaju ne češće nego jedanput u minuti u proseku i treba da obuhvata sve brze slučajeve treperenja kao i redovno ponovno pojavljivanje treperenja. Ovi uslovi su namenjeni za aparate kao što su motori za liftove, automatske pumpe, mašine za pravljenje leda itd., koje se puštaju u rad prilično često, ali ne tako regularno po nekoliko puta u minuti.

4. Izuzetno često treperenje obuhvata slučajeve koji se dešavaju češće nego gornji. Ovaj slučaj je namenjen da obuhvati takve aparate kao što su svetlosni znaci, aparati za zavarivanje, bageri i izvesne električne peći, koji se često i naizmenično zaustavljaju ili puštaju u rad, ili se brzo opterećuju ili rasterećuju u toku normalne upotrebe.

2.6.4. Proračun pada napona pri pokretanju motora

Kao što je rečeno, prema odredbama *Pravilnika o tehničkim normativima za električne instalacije niskog napona* ("Sl. list SFRJ", br. 53/1988. i 54/1988), struja elektromotora pri pokretanju mora se ograničiti na vrednost koja nije štetna za instalacije iz koje se napaja i ne utiče štetno na druge aparate vezane na isti izvor. Direktno napajanje motora naizmenične struje sa kratkospojenim rotorom iz distributivne mreže napona 0,4 kV, dozvoljava se ako su ispunjeni sledeći uslovi:

1. pad napona pri pokretanju ne sme premašiti vrednost pri kojoj dolazi do smanjenja momenta motora tako da ugrožava pouzdan zalet motora i radne mašine, ili utiče na stabilan rad ostalih potrošača vezanih na istu mrežu;

2. zaštita pri pokretanju motora ne sme delovati ni na višem naponskom nivou.

Primenjuje se uprošćena metoda određivanja veličine faznog napona na mestu napajanja motora (sl. 2.53) pri ukočenom rotoru, pomoću formule:

$$U = \frac{U_n}{\sqrt{3} \left(\frac{Z_Q + Z_{TLV}}{Z_L + Z_M} + 1 \right)}$$

gde su:

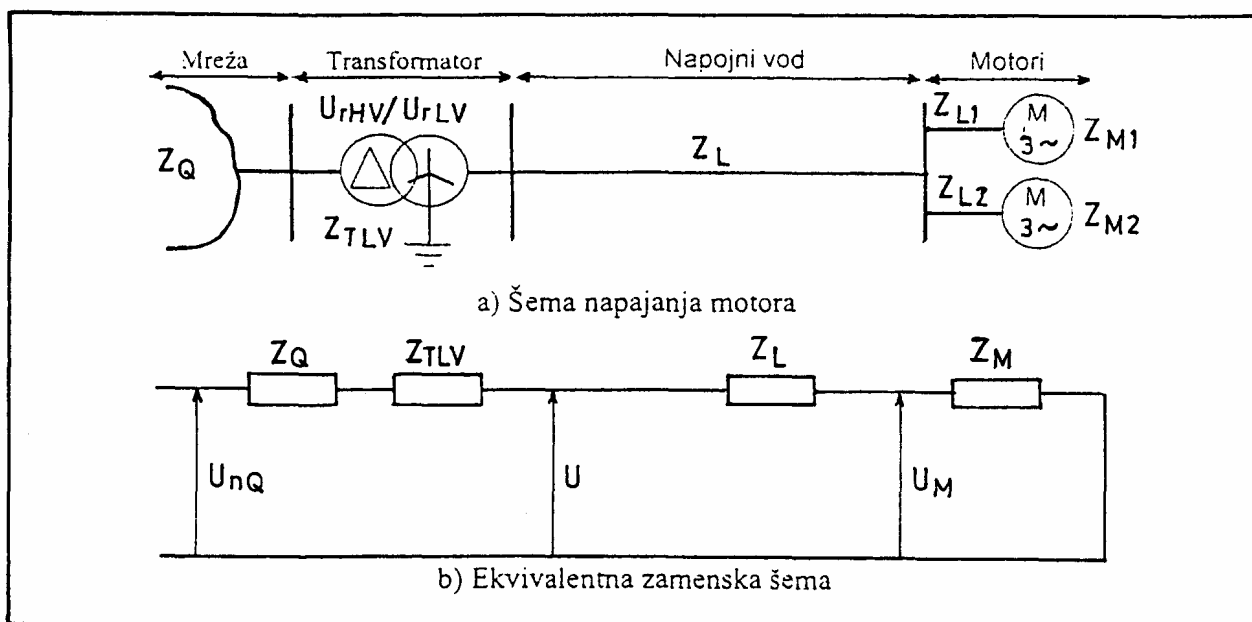
U_n – nazivni napon NN mreže;

Z_Q – impedansa mreže;

Z_{TLV} – impedansa kratkog spoja direktnog redosleda dvonamotajnog transformatora;

Z_L – impedansa napojnog voda direktnog redosleda;

Z_M – impedansa motora direktnog redosleda.



Slika 2.53

Ako je poznata početna simetrična struja kratkog spoja (I_{kQ}) u VN mreži, apsolutna vrednost impedanse kratkog spoja direktnog redosleda (Z_Q) mreže svedena na napon radijalnih sistema, određuje se preko:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}} \left(\frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \right)^2$$

gde su:

U_{nQ} – nazivni napon VN mreže;

U_{rTLV} – nazivni napon niskonaponske strane transformatora VN/NN (*engl. HV/LV*);

U_{rTHV} – nazivni napon visokonaponske strane transformatora VN/NN;

c – naponski faktor.

Impedansa kratkog spoja direktnog redosleda dvonamotajnog transformatora (Z_{TLV}), koji se najčešće koriste za napajanje niskonaponskih radijalnih sistema, računa se iz naznačenih podataka transformatora na sledeći način:

$$Z_{TLV} = \frac{u_{krT}(\%)}{100} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}}$$

gde je: $u_{krT}(\%)$ – napon kratkog spoja transformatora, a S_{rT} – nazivna snaga transformatora.

Impedanse direktnog redosleda napojnih vodova i kablova zavise od konstrukcionih parametara i mogu se dobiti iz podataka proizvođača ili iz tehničkih priručnika. Obično se daju podužne vrednosti aktivne (r) i reaktivne (x) otpornosti u (Ω/km), tako da je:

$$R_L = l \cdot r \quad X_L = l \cdot x$$

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2}$$

gde je l – dužina voda (kablova).

Impedansa motora (Z_M) u direktnom sistemu može se odrediti iz izraza:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

gde su:

U_{rM} – nazivni napon motora;

I_{rM} – nazivna struja motora;

S_{rM} – prividna nazivna snaga motora: $S_{rM} = P_{rM} / (\eta_r \cos \varphi_r)$;

I_{LR} – najveća simetrična efektivna vrednost struje asinhronog motora uz zakočeni rotor priključen na nazivni napon pri nazivnoj frekvenciji;

I_{LR}/I_{rM} – odnos struje pri zakočenom rotoru prema nazivnoj struji motora.

Drugi uprošćeni način za određivanje napona (U) u procentima je pomoću dijagrama:

$$U = f[(Z_Q + Z_{TLV}) / (Z_L + Z_M)] \text{ na slici 2.54.}$$

Motori su obično povezani sa sabirnicama kablovima različite dužine i preseka. Radi pojednostavljenja proračuna, grupu motora, uključujući i njihove povezne kablove, moguće je predstaviti jednim ekvivalentnim motorom. Za ekvivalentne motore zajedno sa njihovim kablovima važi sledeći izraz:

$$Z_M = \left(\sum_i \frac{1}{Z_{Li} + Z_{Mi}} \right)^{-1}$$

gde je Z_{Mi} – impedansa i -tog motora direktnog redosleda, a Z_{Li} – impedansa poveznog kabla i -tog motora direktnog redosleda.

Primer: Proveriti pad napona na glavnoj niskonaponskoj razvodnoj tabli ($U_n = 0,4 \text{ kV}$; $c = 1,0$) koja se napaja iz sredjonaponske mreže ($U_{nQ} = 20 \text{ kV}$; $I_{kQ}'' = 14,43 \text{ kA}$; $c = 1,1$) preko transformatora ($S_{rT} = 400 \text{ kVA}$; $U_{rTHV} = 20 \text{ kV}$; $U_{rTLV} = 0,4 \text{ kV}$; $u_{krT} = 4\%$) pri pokretanju motornog pogona čija se razvodna tabla napaja preko kabla tipa PP/1kV sa provodnikom od bakra preseka 240 mm^2 ($r = 76,2 \text{ m}\Omega/\text{km}$; $x = 79 \text{ m}\Omega/\text{km}$) dužine 50 m . Motorni pogon sastoji se od 2 trofazna asinhrona motora ($i = 1; 2$) koji se koriste za pokretanje radnih mašina ventilatorskih karakteristika.

Podaci o motorima: $P_{rM} = 40 \text{ kW}$; $U_{rM} = 380 \text{ V}$; $\cos \varphi_r = 0,87$; $\eta_r = 0,88$; $I_{LR}/I_{rM} = 5$.

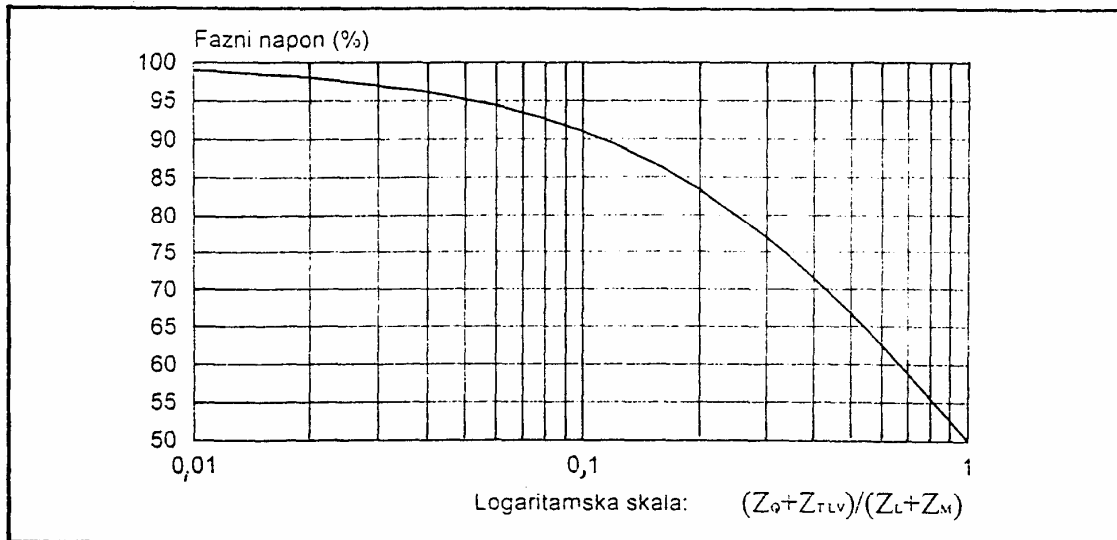
Napojni kabl za svaki motor: PP/1 kV; 50 mm^2 ; $r = 39,1 \text{ m}\Omega/\text{km}$; $x = 83 \text{ m}\Omega/\text{km}$; $l = 5 \text{ m}$.

Impedansa kratkog spoja direktnog redosleda (Z_Q) mreže svedena na napon $0,4 \text{ kV}$ sistema:

$$Z_Q = \frac{1,1 \cdot 20}{\sqrt{3} \cdot 14,43} \left(\frac{0,4}{20} \right)^2 = 0,35 \text{ m}\Omega$$

Impedansa kratkog spoja direktnog redosleda dvonamotajnog transformatora (Z_{TLV}) sa direktno uzemljenom neutralnom tačkom na niženaponskoj strani:

$$Z_{TLV} = \frac{4}{100} \cdot \frac{0,4^2}{0,400} = 16 \text{ m}\Omega$$



Slika 2.54

Impedansa napojnog kabla razvodne table elektromotornog pogona:

$$R_L = 0,05 \cdot 76,2 = 3,81 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = 0,05 \cdot 79 = 3,95 \text{ m}\Omega$$

$$Z_L = \sqrt{3,81^2 + 3,95^2} = 5,5 \text{ m}\Omega$$

Pojedinačne impedanse motora i pripadajućih napojnih kablova:

$$S_{rM1} = S_{rM2} = \frac{40}{0,88 \cdot 0,87} = 52,25 \text{ kVA}$$

$$Z_{M1} = Z_{M2} = \frac{1}{5} \cdot \frac{380^2}{52,25} = 552,8 \text{ m}\Omega$$

$$R_{L1} = R_{L2} = 0,005 \cdot 391 = 1,955 \text{ m}\Omega$$

$$X_{L1} = X_{L2} = 0,005 \cdot 83 = 0,415 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{L1} = Z_{L2} = \sqrt{1,955^2 + 0,415^2} = 2 \text{ m}\Omega$$

Ekvivalentna impedansa grupe motora sa pripadajućim napojnim kablovima:

$$Z_M = \left(\frac{1}{2 + 552,8} + \frac{1}{2 + 552,8} \right)^{-1} = 276,4 \text{ m}\Omega$$

Fazni naponi na glavnoj niskonaponskoj razvodnoj tabli pri pokretanju motornog pogona:

$$U = \frac{400}{\sqrt{3} \left(\frac{0,35 + 16}{5,5 + 276,4} + 1 \right)} = 218,5 \text{ V}$$

Na drugi uprošćeni način, za dati odnos impedansi: $(Z_Q + Z_{TLV}) / (Z_L + Z_M) = 0,058$ iz dijagrama na slici 6 dobija se napon: $U = 94,5\%$ faznog napona, odnosno: $U = 0,945(400 / \sqrt{3}) = 218,5 \text{ V}$. Kao što se vidi, pad napona po fazi na glavnoj niskonaponskoj razvodnoj tabli pri jednovremenom pokretanju oba motora iznosi oko 12,7V (ili 5,5%). Ako se radi o glavnoj niskonaponskoj razvodnoj tabli, čija se cela snaga ne daje samo elektromotornom pogonu, ovaj pad napona može da se toleriše za slučajeve koje izazivaju ventilatori, a koji se događaju 6 puta ili manje u 24 časa, ali ne manje nego jedanput između 6 h i 24 h (tzv. retka treperenja).

Komentar: Projektanti često prave grešku tako što koriste obrazac za proračun pada napona u niskonaponskim trofaznim kolima sa simetričnim opterećenjem, s tim što se za opterećenje kola uzima n -tostruka snaga (gde je: $n = I_{LR} / I_{RM}$ – odnos struje pri zakočenom rotoru prema nazivnoj struji motora). Naime, ako se procentualni pad napona, za gornji primer, izračuna po približnoj formuli:

$$u = \frac{P \ell \rho}{U^2 A} \cdot 10^5 = \frac{(5 \cdot 2 \cdot 40) \cdot 50 \cdot 0,01793}{400^2 \cdot 240} \cdot 10^5 \approx 1 (\%)$$

dobije se pad napona od glavne niskonaponske razvodne table do mesta ugradnje motora, i to pri jednovremenom pokretanju oba motora. Prema tome, ukupan procentualni pad faznog napona na priključcima motora iznosi: $(5,5 + 1)\% = 6,5\%$, što odgovara naponu po fazi: $U_M = (400 / \sqrt{3}) \cdot (100 - 6,5) / 100 = 216,2 \text{ V}$ (sl. 2.55).