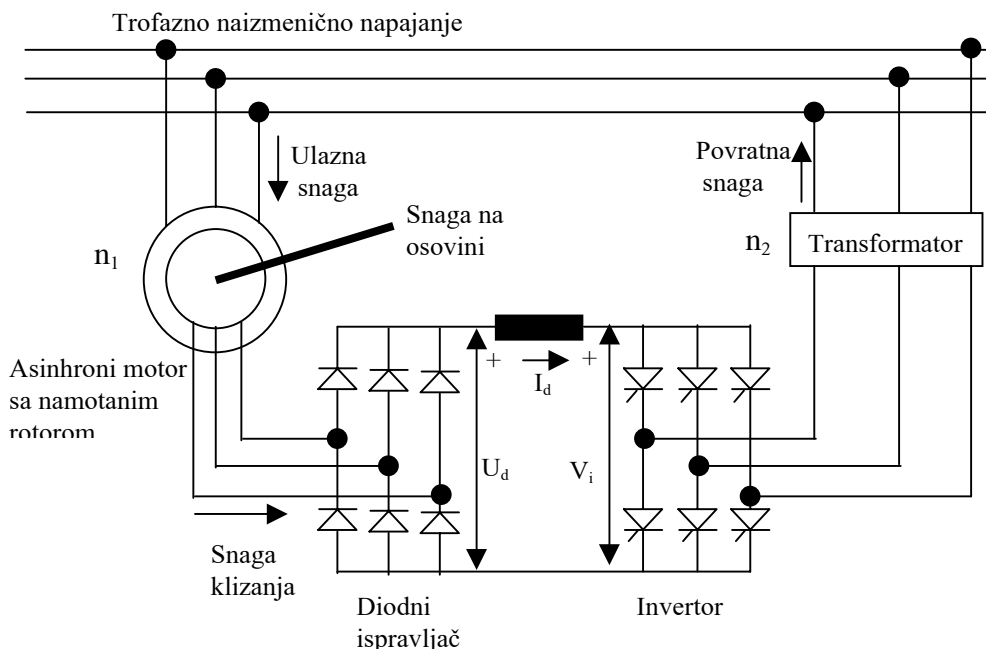


Analizirati funkcionalne zavisnosti elektromehaničkih veličina kod podsinhronne kaskade koje su bitne za dimenzionisanje komponenti električne instalacije. Smatrati da je mašina idealna: zanemariti sve gubitke i padove napona na omskim otporima i rasipnim reaktansama, kao i reaktansu magnećenja.

- a) Uspostaviti vezu između brzine motora i ugla paljenja tiristora mrežom vodjenog invertora (regulaciona karakteristika).
- b) Izvesti izraz za elektromagnetni moment u funkciji struje u jednosmernom medjukolu.
- v) Odrediti maksimalne struje i napone u svim delovima instalacije za slučaj pogona centrifugalnih crpki (otporni moment $M \sim c n^2$), čiju je brzinu potrebno regulisati u opsegu $(0.8 - 1) n_N$.
- g) Koje su prednosti primene kratkospajajućeg u odnosu na klasični inverter u postrojenju podsinhronne kaskade?

REŠENJE:

Podsinhrona kaskada se sastoji od tri bitna dela: ispravljača, invertora i mrežnog transformatora. Inverter može biti klasičnog tipa ili kratkospajajući. Ova tri dela su prikazana električnom šemom na slici 3.1d. Ovaj pogon ima sledeće dobre osobine: 1. zbog rekuperacije energije klizanja u mrežu ima visok stepen korisnog dejstva (za razliku od pogona koji se reguliše preko rotorskih otpornika), 2. ispravljač, inverter i transformator se dimenzionišu za malu snagu (snagu rekuperacije, koja je pri malom opsegu regulacije brzina mala) i 3. karakteristike su slične karakteristikama jednosmernog motora sa nezavisnom pobudom, što omogućava prostu regulaciju. Loše osobine pogona su: 1. zahteva korišćenje asinhronog motora sa namotanim rotorom i 2. ima loš faktor snage.



Fluks u medjugvoždju se može smatrati konstantnim ako se zanemare padovi napona na omskim otporima i rasipnim reaktansama statora (obrtni fluks stvara kontraelektromotornu silu koja uravnotežava konstantni napon koji je doveden na stator asinhronog motora). Promenom ugla paljenja tiristora u invertoru čija je naizmnična strana priključena na krutu mrežu menja se veličina napona U_d između ispravljača i

invertora, čime se utiče na veličinu elektromotorne sile (EMS-e) u rotoru, odnosno na brzinu obrtaja rotora motora. Porast napona U_d je praćen smanjenjem brzine, odnosno on je srazmeran klizanju. Kada je napon U_d jednak EMS-i, odnosno naponu ukočenog rotora, brzina motora je nula. Ovo će biti detaljnije objašnjeno preko pojednostavljenih jednačina koje opisuju električne i mehaničke procese.

a) Do regulacione karakteristike se dolazi analizom napona na statorskoj i rotorskoj strani motora. Zanimajući padove napona na omskim otporima i rasipnim reaktansama statora i rotora, između napona statora i napona u jednosmernom medjukolu rotora postoji veza

$$U_d = \frac{1.35}{n_1} s U_L, \quad (1)$$

gde su: n_1 koeficijent svodjenja napona sa statora na rotor, U_L linijski napon statora i s klizanje. Vrednost $s U_L/n_1$ je napon, odnosno elektromotorna sila rotora. Koeficijent 1.35 potiče od trofaznog diodnog ispravljačkog mosta. Odnos napona u jednosmernom medjukolu i napona mreže, na koju je preko transformatora vezana naizmjenična strana invertora glasi

$$V_I = \frac{1.35}{n_2} U_L |\cos\alpha|, \quad (2)$$

gde su: n_2 prenosni odnos transformatora preko koga se inverter vezuje na mrežu i α ugao paljenja tiristora, koji se teoretski menja od 90 do 180° . U_L/n_2 je napon na naizmjeničnoj strani invertora. U stacionarnom stanju, uz zanemarenje pada napona na otpornosti prigušnice, naponi V_I i U_d su jednaki, odakle se dobija klizanje

$$s = \frac{n_1}{n_2} |\cos\alpha|, \quad (3)$$

odnosno ugaona brzina obrtanja

$$\omega_r = \omega_s \left(1 - |\cos\alpha| \frac{n_1}{n_2} \right). \quad (4)$$

b) Do izraza za elektromagnetni momenat se može doći na osnovu energetske bilansa u mašini.

Snaga kojom se energija vraća u mrežu iz rotora motora (preko transformatora) iznosi

$$P = \operatorname{Re}(3 \underline{E}_2 \underline{I}_2) = \operatorname{Re}(s 3 \underline{E}_1 \underline{I}_1) = s P_{ob} \quad (5)$$

gde su: $\underline{E}_2 = \underline{U}_r$ i $\underline{I}_2 = \underline{I}_r$ elektromotorna sila i struja rotora (fazne vrednosti), $\underline{E}_1 = \underline{U}_f$ i $\underline{I}_1 = \underline{I}_M$ vrednosti elektromotorne sile i struje statora (fazne vrednosti) ($\underline{E}_2 = s \underline{E}_1/n_1$, s obzirom na konstantan fluks u mašini, i $\underline{I}_2 = \underline{I}_1 n_1$, s obzirom da je zanemarena reaktansa magnećenja), s klizanje i P_{ob} obrtna snaga motora.

Izražavanjem snage rekuperacije (P) preko napona i struje u jednosmernom medjukolu dolazi se do

$$P = V_I I_d \Rightarrow s P_{ob} = V_I I_d \Rightarrow P_{ob} = \frac{V_I I_d}{s}, \quad (6)$$

gde su: V_I vrednost jednosmernog napona iza prigušnice i I_d jačina jednosmerne struje (ispravljena struja rotora).

Na osnovu bilansa snaga, prema kome je obrtna snaga (snaga koja se predaje rotoru) jednaka zbiru mehaničke i snage rekuperacije iz rotora u mrežu, dobija se izraz za mehaničku snagu (P_{meh})

$$P_{meh} = P_{ob} - P = P_{ob} - s P_{ob} = (1-s) P_{ob}. \quad (7)$$

Mehanička snaga se može izraziti i preko momenta i ugaone brzine obrtanja motora na način

$$P_{meh} = M \omega_r = M \omega_s (1-s), \quad (8)$$

gde su: M elektromagnetni momenat, ω_r ugaona brzina rotora i ω_s sinhrona ugaona brzina. Iz jednačina (6), (7) i (8) se dobija

$$M = \frac{V_l I_d}{s \omega_s}. \quad (9)$$

Smenom vrednosti za V_l iz (2) i klizanja iz (3) u (9), dolazi se do tražene zavisnosti elektromagnetnog momenta u funkciji struje u jednosmernom medjukolu

$$M = \frac{1.35 U_L}{\omega_s n_l} I_d. \quad (10)$$

Iz prethodne jednačine se jasno uočava da je elektromagnetni momenat srazmeran struji I_d , i da se ovakav pogon u svojoj prvoj aproksimaciji ponaša kao pogon sa jednosmernim motorom sa nezavisnom pobudom u svojoj prvoj aproksimaciji (brzina je srazmerna naponu statora, a momenat struji).

v) Kod centrifugalnih crpki, o kojima je ovde reč, zavisnost otpornog momenta od brzine obrtanja ima oblik $M \sim c n^2$, što znači da će i struja rotora (naizmenična i ispravljena vrednost) na isti način zavisiti od brzine (pošto je moment direktno srazmeran struji I_d). Dakle, najveća struja I_d se ima pri najvećem momentu, odnosno najvećoj brzini. Ta radna tačka predstavlja nominalnu, odnosno radnu tačku prema kojoj je dimenzionisan sam motor. To znači da je $I_{rmax} = I_{rn}$, odnosno maksimalna struja I_{dmax} jednaka vrednosti ispravljene struje I_{rn} . Napon merodavan za dimenzionisanje elemenata podsinhronne kaskade je jednak naponu u rotoru za najveće pretpostavljeno klizanje, odnosno približno vrednosti EMS-e pri najmanjoj pretpostavljenoj brzini.

Ako je ispravljač izveden kao trofazna mostna sprega, što je najčešći slučaj u praksi, važi odnos

$$\frac{I_r}{I_d} = 0.82 \quad / \quad \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.82/, \quad (11)$$

gde je I_r efektivna vrednost struje rotora, a I_d njena ispravljena jednosmerna vrednost, odnosno

$$\frac{U_d}{U_r} = 2.34, \quad (12)$$

gde je U_r napon rotora (efektivna linijska vrednost), a U_d njegova ispravljena jednosmerna vrednost. Dakle, $I_{dmax} = I_{rn} / 0.82$ i $U_{dmax} = 2.34 U_{rmax} / \sqrt{3}$.

Kod klasičnog trofaznog mrežom vodjenog invertora najveća efektivna vrednost struje na naizmeničnoj strani iznosi $I_{Mmax} = 0.82 \cdot I_{dmax} = I_{rn}$. Primetimo da je pri brzinama bliskim nominalnoj (manja klizanja) udeo aktivne komponente sasvim mali, a povećava se sa povećanjem klizanja. Iz jednačine (5) se jasno uočava da snaga koja se vraća u mrežu teži nuli kada klizanje teži nuli, što je približno slučaj u nominalnoj radnoj tački. Korektna analiza se može izvršiti na osnovu izraza postavljenog polazeći od (5), korišćenjem (7) i izraza za mehaničku snagu, koja je jednaka proizvodu momenta i brzine ($P_{meh} = M \omega_r = \text{const.} \cdot \omega_r^2 \cdot \omega_r$),

$$P = s P_{ob} = \frac{s}{1-s} P_{meh} = \frac{s}{1-s} const. \omega_r^3 = s(1-s)^2 const. \omega_s^3 = const. \cdot s(1-s)^2.$$

Da bi se na jednosmernoj strani invertora ostvario potrebni napon U_{dmax} na naizmeničnoj strani invertora je potrebno imati efektivnu vrednost napona

$$U_{Mmax} = \frac{\sqrt{3} U_{dmax}}{2.34} = U_{rmax}. \quad (13)$$

Naravno, za radnu tačku $U_d = U_{dmax}$ za mrežom vođeni tiristorski inverter most je "potpuno otvoren".

Na osnovu prethodnog izlaganja o kaskadi, struja u rotoru motora će uvek biti manja od nominalne struje rotora $I_r < I_{rn}$ a napon U_r manji od elektromotorne sile koja je jednaka proizvodu maksimalnog zahtevanog klizanja (0.2) i elektromotorne sile izmerene pri otvorenim krajevima namotanog rotora u stanju mirovanja $EMS_{max} = 0.2 EMS_{ks} = U_L / n_l$.

Prenosni odnos mrežnog transformatora, čija se snaga kod ovog tipa invertora određuje prema najvećem naponu i najvećoj struji, iznosi

$$n_T = \frac{U_L}{EMS_{max}} \quad (14)$$

(na ovaj način se koristi pun opseg regulacije invertorskog mosta i minimiziraju se struje na mrežnoj strani invertora), pa će na mrežnoj strani transformatora struja, merodavna za dimenzionisanje instalacionih komponenti, iznositi

$$I_{Tmax} = \frac{EMS_{max}}{U_L} I_{rn}. \quad (15)$$

g) Ako se umesto klasičnog invertora koristi kratkospajajući, oprema na njegovoj mrežnoj strani se može dimenzionisati za manju snagu. Kod kratkospajajućeg invertora efektivna vrednost struje invertora na naizmeničnoj strani, za $M = c n^2$, ima maksimalnu vrednost pri klizanju koje je veće od minimalnog [1]. Setimo se da je kod klasičnog invertora efektivna vrednost struje dostizala svoju maksimalnu vrednost pri najvećim brzinama. Ona iznosi približno [1]:

$$I_{Mmax} = 0.6 I_{dmax} = 0.6 I_{rn} / 0.82.$$

Napon na naizmeničnoj strani kratkospajajućeg invertora je jednak

$$U_M = 1.11 \frac{EMS_{max}}{3} \quad (16)$$

i imaće najveću vrednost pri najvećem klizanju. Prenosni odnos transformatora, čija je snaga sada znatno manja, treba da bude oko 2.6 (3/1.11) puta veći od prenosnog odnosa transformatora koji je bio potreban kod klasičnog invertora. Povećanje prenosnog odnosa transformatora, uz smanjenje maksimalne struje na naizmeničnoj strani invertora u odnosu na klasičan inverter, rezultuje da se struja na mrežnoj strani transformatora smanjuje oko 3.6 (3/1.11 · 0.82/0.6) puta.

[1] Đ. Kalić, P. Miljanić: Ušteda u investicijama i poboljšanje korisnog dejstva podsinhronih kaskada primenom kratkospajajućih invertora", Drugo savetovanje o energetskej elektronici, Beograd, Novembar 1975, str. 106-117