

РЈЕШЕЊА ЗАДАТАКА СА ТАКМИЧЕЊА ИЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНА

Електријада 2009.

ТРАНСФОРМАТОРИ

Једнофазни трансформатор са подацима $6kVA$, $220V/60V$ има релативни напон кратког споја $u_k = 12,5\%$. Примар трансформатора прикључен је на номинални напон номиналне учестаности, а секундар оптерећен са $2,5kW$ уз индуктивни фактор снаге $\cos\varphi = 0,7$. Познато је да је у овом режиму степен искориштења снаге максималан и износи 90% . Колики је тада напон секундара?

РЈЕШЕЊЕ:

Привидна снага у траженом режиму је $S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{2500}{0,7} = 3.57kVA$, а губици су:

$$\sum P_g = \frac{1-\eta}{\eta} \cdot P = \frac{1-0,9}{0,9} \cdot 2500 = 277,7W.$$

Машина постиже максимални степен искориштења снаге када су губици који зависе и не зависе од оптерећења међусобно једнаки:

$$P_{Fen} = P_{Cu} = \frac{\sum P_g}{2} = \frac{277,7}{2} = 138,85W.$$

Губици у бакру пропорционални су квадрату струје, па су номинални губици у бакру:

$$P_{Cun} = P_{Cu} \left(\frac{S_n}{S} \right)^2 = 138,85 \left(\frac{6000}{3570} \right)^2 = 392,2W.$$

Активна компонента релативног напона кратког споја је:

$$u_r [\%] = \frac{P_{Cun}}{S_n} \cdot 100 = \frac{392,2}{6000} \cdot 100 = 6,54\%, \text{ а индуктивна:}$$

$$u_x [\%] = \sqrt{u_k^2 [\%] - u_r^2 [\%]} = \sqrt{12,5^2 - 6,54^2} = 10,65\%,$$

па је релативни пад напона:

$$\Delta u [\%] \approx [u_r [\%] \cos\varphi + u_x [\%] \sin\varphi] \frac{S}{S_n} = [6,95 \cdot 0,7 + 10,65 \cdot \sin(\arccos 0,7)] \frac{3570}{6000} = 7,42\%.$$

Напон на секундару је

$$U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta u [\%]}{100} \right) = 60 \left(1 - \frac{7,428}{100} \right) = 55,54V.$$

МАШИНЕ ЈЕДНОСМЈЕРНЕ СТРУЈЕ

Генератор једносмјерне струје има сложену адитивну побуду. Карактеристика празног хода снимљена је при брзини од 1200 o/min . Тада је установљено да се карактеристика магнећења може апроксимирати правом $E_0[V] = 200I_{pe}[A]$. Отпор арматуре је $R_a = 0,4\Omega$, паралелни побудни намотај има $N_{PP} = 2700$ навојака по полу и укупни отпор $R_{PP} = 100\Omega$, а редни побудни намотај има $N_{PR} = 27$ навојака по полу и укупни отпор $R_{PR} = 0,04\Omega$.

Колика је брзина обртања вратила генератора ако је његов напон $240V$, струја $55A$, а на ред са паралелним побудним намотајем везан додатни отпорник од 250Ω ?

РЈЕШЕЊЕ

Струја паралелног побудног намотаја је:

$$I_{PP} = \frac{U_a}{R_{PP} + R_d} = \frac{240}{100 + 250} = 0,686A.$$

Струја арматуре је:

$$I_a = I + I_{PP} = 55 + 0,686 = 55,686A.$$

Електромоторна сила генератора је:

$$E = U_a + (R_a + R_{PR})I_a + \Delta U_c = 240 + (0,4 + 0,04) \cdot 55,686 + 2 = 266,5V.$$

Систем побуђивања са флуксевима који потичу од паралелног и редног побудног намотаја потребно је еквивалентирати одговарајућом побудном струјом која би се имала да је машина независно побуђена. Та еквивалентна побудна струја је:

$$I_{pe} = I_{PP} + \frac{N_{PR}}{N_{PP}} I_a = 0,686 + \frac{27}{2700} 55,686 = 1,24A.$$

Струја I_{pe} у генератору са независном побудом ствара исти флукс као и струје $I_{PP} = 0,686A$ паралелног и $I_{PR} = I_a = 55,686A$ редног побудног намотаја. Одговарајућа електромоторна сила је $E = k\Phi n$, гдје је Φ еквивалентни флукс.

Еквивалентна струја побуде у празном ходу и при брзини од 1200 o/min индукује електромоторну силу која се може одредити из карактеристике празног хода

$$E_{01} = 200 \cdot I_{pe} = 200 \cdot 1,24 = 248,57V,$$

док при радној брзини и задатом терету еквивалентна побудна струја индукује електромоторну силу $E = 266,5V$. Због тога је тражена брзина:

$$n = \frac{E}{E_{01}} n_0 = \frac{266,5}{248,57} 1200 = 1286,56 \text{ o/min}.$$

АСИНХРОНЕ МАШИНЕ

Трофазни асинхрони мотор номиналних података $630kW$, $6kV$, $50Hz$, Y , $1410o/min$ развија номинални превални момент при брзини од $1120o/min$. Грана магнетнења, губици на трење и вентилацију и отпор статора могу се занемарити.

Мотор се превеже у спрегу троугао и прикључи на трофазну мрежу напона $2kV$, учестаности $42Hz$. Колику снагу на вратилу развија мотор када је брзина обртања $1200o/min$?

РЈЕШЕЊЕ:

Номинални момент, номинално клизање, и номинално превално клизање су:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{60P_n}{2\pi n_n} = \frac{60 \cdot 630 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 1410} = 4,267kNm,$$

$$s_n = \frac{n_{sn} - n_n}{n_{sn}} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,06,$$

$$s_{prn} = \frac{n_{sn} - n_{prn}}{n_{sn}} = \frac{1500 - 1120}{1500} = 0,253.$$

На основу Клосове формуле:

$$M = \frac{2M_{pr}}{\frac{s}{s_{pr}} + \frac{s_{pr}}{s}}, \text{ номинални превални момент је:}$$

$$M_{prn} = \frac{1}{2} \left(\frac{s_n}{s_{prn}} + \frac{s_{prn}}{s_n} \right) M_n = \frac{1}{2} \left(\frac{0,06}{0,253} + \frac{0,253}{0,06} \right) 4,267 \cdot 10^3 = 2,23M_n = 9,51kNm.$$

Када се мотор превеже у троугао и прикључи на другу мрежу, промијениће се превални момент и превално клизање јер су се промијенили фазни напон и учестаност напајања.

Превални момент пропорционалан је количнику квадрата напона и учестаности:

$$M_{pr} \sim \left(\frac{U}{f} \right)^2,$$

па је превални момент на новој мрежи:

$$M_{pr1} = M_{prn} \left(\frac{U_1 f_n}{f_1 U_n} \right)^2 = M_{prn} \left(\frac{V_{n1} f_n \sqrt{3}}{f_1 V_n} \right)^2 = 9510 \left(\frac{2000 \cdot 50}{42 \cdot 6000} \sqrt{3} \right)^2 = 4,49kNm$$

Превално клизање је обрнуто пропорционално учестаности:

$$s_{pr} = \frac{R_r}{\omega_s (L_{js} + L_{jr})},$$

па је превално клизање на новој мрежи:

$$s_{pr1} = s_{prn} \frac{f_n}{f_1} = 0,253 \frac{50}{42} = 0,3.$$

Клизање на новој мрежи је:

$$s_1 = \frac{n_{s1} - n_1}{n_{s1}} = \frac{\frac{60f_1}{p} - n_1}{\frac{60f_1}{p}} = \frac{\frac{60 \cdot 42}{2} - 1200}{\frac{60 \cdot 42}{2}} = 0,0476,$$

па је развијени момент на основу Клосове формуле:

$$M_1 = \frac{2M_{pr1}}{\frac{s_1}{s_{pr1}} + \frac{s_{pr1}}{s_1}} = \frac{2 \cdot 4490}{\frac{0,0476}{0,3} + \frac{0,3}{0,0476}} = 1,39kNm.$$

Снага на вратилу је:

$$P_{m1} = M_1 \omega_1 = M_1 \frac{2\pi n_1}{60} = 1390 \frac{2 \cdot \pi \cdot 1200}{60} = 174,6kW.$$

НАПОМЕНА:

Други, знатно компликованији начин за рјешавање задатка, је да се формира систем једначина:

$$s_{pr} = \frac{R_r}{\omega_s (L_{\gamma s} + L_{\gamma r})},$$

$$M_n = \frac{3p}{\omega_{sn}} U_{nf}^2 \frac{R_r' / s_n}{(R_r' / s_n)^2 + [\omega_{sn} (L_{\gamma s} + L_{\gamma r})]^2},$$

и из њега одреде R_r' и $L_{\gamma s} + L_{\gamma r}'$, па даље уврсте у израз за момент на новој мрежи:

$$M_1 = \frac{3p}{\omega_{1n}} U_{1f}^2 \frac{R_r' / s_1}{(R_r' / s_1)^2 + [\omega_{s1} (L_{\gamma s} + L_{\gamma r})]^2}.$$

СИНХРОНЕ МАШИНЕ

Трофазни синхрони турбогенератор има следеће номиналне податке: $45MVA$, $14,4kV$, Y , $50Hz$, синхрона реактанса је $x_s = 110\%$. Отпор статора и сви губици активне снаге могу се занемарити. Карактеристика празног хода (зависност индуковане електромоторне силе од струје побуде) снимљена је при номиналној брзини и приказана табеларно.

$I_p [A]$	100	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
$E_{0f} [kV]$	5	7,05	11,1	14,6	17,7	20	21,9	22,2	22,5

Генератор у мрежу номиналног напона испоручује $30MW$ уз индуктивни фактор снаге $\cos \varphi = 0,8$. Због квара на прикључном далеководу, напон у све три фазе генератора смањи се за 70% . Колико износи минимална струја побуде која ће обезбиједити да генератор не испадне из синхронизма током трајања квара? Сматрати да се побудна струја може успоставити довољно брзо.

РЈЕШЕЊЕ

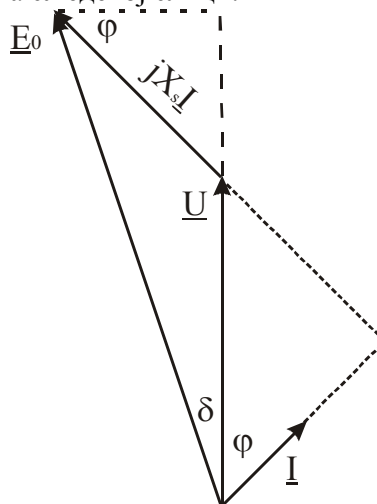
Номинални фазни напон и струја генератора задатом режиму су:

$$U_{fn} = \frac{V_n}{\sqrt{3}} = \frac{14,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 8,313kV, \quad I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \cos \varphi} = \frac{30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 14,4 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 1504A,$$

а синхрона реактанса је:

$$X_s = \frac{x_s [\%]}{100} \frac{V_n^2}{S_n} = \frac{110}{100} \frac{14400^2}{45 \cdot 10^6} = 5,068\Omega$$

Једначина напонске равнотеже синхроног надпобуђеног генератора је $\underline{E}_0 = \underline{U} + jX_s I_s$, а фазорски дијаграм приказан је на следећој слици:



На основу фазорског дијаграма пишу се следеће једначине:

$$E_{0f} \cos \delta = U_f + X_s I \sin \varphi$$

$$E_{0f} \sin \delta = X_s I \cos \varphi,$$

па је угао оптерећења:

$$\delta = \arctan \frac{X_s I \cos \varphi}{U_f + X_s I \sin \varphi} = \arctan \frac{5,068 \cdot 1504 \cdot 0,8}{8313 + 5,068 \cdot 1504 \cdot 0,6} = 25,32^\circ .$$

Фазна вриједност електромоторне силе у овом режиму је:

$$E_{0f} = \frac{X_s I \cos \varphi}{\sin \delta} = \frac{5,068 \cdot 1504 \cdot 0,8}{\sin 25,32^\circ} = 14,239 kV .$$

На основу угаоне карактеристике синхроне турбомашине:

$$P = \frac{3U_f E_{0f}}{X_s} \sin \delta ,$$

може се закључити да ће у режиму кратког споја, угао оптерећења веома порасти јер се напон мреже смањује, а снага турбине не мијења. Ако се електромоторна сила не би промијенила, нови угао оптерећења при сниженом напону рачунао би се из:

$$\sin \delta = \frac{PX_s}{3U_{f1} E_{0f}} = \frac{30 \cdot 10^6 \cdot 5,068}{3 \cdot 0,3 \cdot (14400 / \sqrt{3}) \cdot 14239} = 1,423 ?!$$

Угао оптерећења би због драстичног пада напона статора постао већи од 90° и генератор би испао из синхронизма. Да би се предуприједио испад генератора, потребно је повећати побудну струју, тј. електромоторну силу, како би угао оптерећења остао мањи од 90° . Ако се побудна струја може успоставити довољно брзо (тј. да коло којим се напаја побудни намотај може да обезбиједи довољно висок напон), електромоторна сила се може повећати прије него што ће угао оптерећења прећи граничну вриједност.

Гранични (теоријски) случај има се када је струја побуде тако повећа да угао оптерећења буде тачно једнак 90° , па је потребна електромоторна сила:

$$E_{0f} = \frac{PX_s}{3U_f} = \frac{30 \cdot 10^6}{3 \cdot 0,3 \cdot (14400 / \sqrt{3})} = 20,34 kV .$$

Фазној вриједности електромоторне силе од $E_{0f1} = 20,34 kV$ одговара струја побуде $1000 A < I_{p1} < 1200 A$. Линеарном интерполацијом криве магнећења између тачака $(1000 A, 20 kV)$ и $(1200 A, 21,90 kV)$ можемо одредити потребну струју побуде за $E_{0f1} = 20,34 kV$:

$$(E_{0f1} - 20 \cdot 10^3) = \frac{21,9 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^3}{1200 - 1000} (I_{p1} - 1000),$$

па је потребна струја побуде

$$I_{p1} = 1035,79 A .$$

Режим рада када се одржава динамичка стабилност генератора током драстичних падова напона на мрежи назива се режим форсирања побуде.

Задатке приредио
мр Петар Матић, ЕТФ Бања Лука