



„EUROELEKTRA”
Ogólnopolska Olimpiada Wiedzy Elektrycznej i Elektronicznej
Rok szkolny 2013/2014

Zadania z elektrotechniki na zawody III stopnia (finał)
z rozwiązaniami

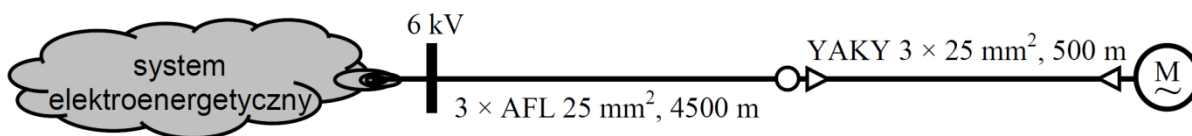
Zadanie 1

W przepompowni planuje się zainstalować pompę zasilającą, napędzaną przez silnik klatkowy SN typu *Sf 450 X4* o danych:

$P_n = 400$ kW – moc znamionowa, $U_{Mn} = 6000$ V – napięcie znamionowe, $f_n = 50$ Hz – częstotliwość znamionowa, $n_n = 990$ obr/min – znamionowa prędkość obrotowa, $\eta_n = 94,8\%$ – sprawność znamionowa, $\cos\varphi_n = 0,84$ – znamionowy współczynnik mocy, $\lambda_n = M_{max}/M_n = 2,3$ – przeciążalność znamionowa, $M_{kr} = M_k/M_n = 1,2$ – wartość względna momentu rozruchowego, $I_{kr} = I_k/I_n = 5,8$ – wartość względna prądu rozruchowego.

Dodatkowo wiadomo, że współczynnik mocy przy zwarciu (przy zablokowanym wirniku) $\cos\varphi_k = 0,12$.

Silnik ma być zasilany z rozdzielni 6 kV stacji transformatorowej (rys. 1) za pomocą linii napowietrznej $3 \times \text{AFL } 25 \text{ mm}^2$ o długości $l_{LN} = 4500$ m (parametry jednostkowe linii napowietrznej: $r = 1,25 \Omega/\text{km}$, $x = 0,40 \Omega/\text{km}$) oraz, w końcowym odcinku, linią kablową $\text{YAKY } 3 \times 25 \text{ mm}^2$ o długości $l_{LK} = 500$ m (parametry jednostkowe linii kablowej: $r = 1,14 \Omega/\text{km}$, $x = 0,08 \Omega/\text{km}$). Napięcie znamionowe rozdzielni 6 kV wynosi $U_{STn} = 6300$ V, a moc zwarciova na szynach rozdzielni wynosi $S_{STk} = 60,0 \text{ MV}\cdot\text{A}$. Początkowy moment oporowy pompy zasilającej, napędzanej przez silnik, wynosi 60% momentu znamionowego silnika.



Rys. 1. Schemat układu zasilającego silnik

Czy przy danych warunkach zasilania możliwy będzie rozruch zainstalowanego silnika indukcyjnego klatkowego? W obliczeniach pominąć rezystancje styków aparatury łączeniowej, niepokazanej na rysunku 1, oraz rezystancję i reaktancję szyn zbiorczych rozdzielni 6 kV.

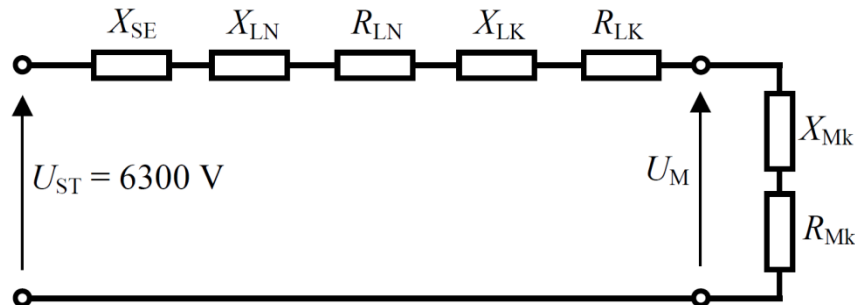
Wskazówka:

Należy przyjąć, że moc zwarciova na szynach rozdzielni 6 kV spowodowana jest wyłącznie reaktancją zastępczą systemu elektroenergetycznego, którą można obliczyć ze wzoru

$$X_{SE} = 1,1 \cdot \frac{U_{STn}^2}{S_{STk}}.$$

Rozwiązanie zadania 1

W celu rozwiązania zadania należy wszystkie elementy układu przesyłowego oraz silnika w stanie zwarcia, czyli w pierwszej chwili rozruchu, przedstawić w postaci rezystancji i reaktancji zastępczych (rys. 1R).



Rys. 1R. Schemat zastępczy analizowanego układu elektrycznego

Następnie obliczamy kolejno:

- reaktancję zastępczą systemu energetycznego

$$X_{SE} = 1,1 \cdot \frac{U_{STn}^2}{S_{STk}} = 1,1 \cdot \frac{6300^2}{60,0 \cdot 10^6} = 0,72765 \, \Omega,$$

- reaktancję zastępczą linii napowietrznej

$$X_{LN} = x_{LN} \cdot l_{LN} = 0,40 \cdot 4,5 = 1,800 \, \Omega,$$

- rezystancję zastępczą linii napowietrznej

$$R_{LN} = r_{LN} \cdot l_{LN} = 1,25 \cdot 4,5 = 5,625 \, \Omega,$$

- reaktancję zastępczą linii kablowej

$$X_{LK} = x_{LK} \cdot l_{LK} = 0,08 \cdot 0,5 = 400 \, \text{m}\Omega,$$

- rezystancję zastępczą linii kablowej

$$R_{LK} = r_{LK} \cdot l_{LK} = 1,14 \cdot 0,5 = 570 \, \text{m}\Omega.$$

W celu obliczenia parametrów silnika w stanie zwarcia obliczmy kolejno:

- prąd znamionowy silnika

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,84 \cdot 0,948} = 48,33 \, \text{A},$$

- impedancję zastępczą silnika w stanie zwarcia

$$Z_{Mk} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{kr} \cdot I_n} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 5,8 \cdot 48,3} = 12,36 \, \Omega,$$

- rezystancję zastępczą silnika w stanie zwarcia

$$R_{Mk} = Z_{Mk} \cdot \cos \varphi_k = 12,36 \cdot 0,12 = 1,483 \, \Omega,$$

- reaktancję zastępczą silnika w stanie zwarcia

$$X_{Mk} = Z_{Mk} \cdot \sin \varphi_k = 12,36 \cdot \sqrt{1 - 0,12^2} = 12,27 \, \Omega.$$

Teraz można obliczyć impedancję widzianą z szyn rozdzielni 6 kV:

$$Z_{zast} = \sqrt{(R_{LN} + R_{LK} + R_{Mk})^2 + (X_{SE} + X_{LN} + X_{LK} + X_{Mk})^2},$$

$$Z_{zast} = \sqrt{(5,625 + 0,570 + 1,483)^2 + (0,72765 + 1,800 + 0,0400 + 12,27)^2} = 16,7 \, \Omega,$$

a na tej podstawie napięcie na zaciskach silnika

$$U_M = U_{STn} \cdot \frac{Z_{Mk}}{Z_{zast}} = 6300 \cdot \frac{12,36}{16,7} = 4,66 \, \text{kV}.$$

Moment rozruchowy silnika zależy od kwadratu napięcia zasilającego. A więc

$$M_k = M_{kr} \cdot M_n \cdot \left(\frac{U_M}{U_{Mn}} \right)^2 = 1,2 \cdot \left(\frac{4,66 \cdot 10^3}{6000} \right)^2 \cdot M_n = 0,724 \cdot M_n.$$

Ponieważ początkowy moment oporowy pompy jest równy tylko $0,6 \cdot M_n$, to możliwy jest w takiej sytuacji rozruch silnika.

Zadanie 2

Silnik indukcyjny klatkowy ma następujące dane znamionowe:

$P_n = 22 \text{ kW}$ – moc znamionowa,

$n_n = 1465 \text{ obr/min}$ – znamionowa prędkość obrotowa,

$\eta_n = 91\%$ – sprawność znamionowa,

$\cos\varphi_n = 0,90$ – znamionowy współczynnik mocy,

$U_n = 400 \text{ V } \triangle$ – napięcie znamionowe,

$I_n = 38,8 \text{ A } \triangle$ – prąd znamionowy,

$\lambda_n = M_{\max n}/M_n = 2,8$ – wartość względna momentu maksymalnego, przeciążalność.

$f_n = 50 \text{ Hz}$ – częstotliwość znamionowa.

Silnik zasilono z tranzystorowej przetwornicy częstotliwości napięciem o zmiennej wartości i częstotliwości, utrzymując stałą wartość stosunku $U/f = U_n/f_n$. Silnik obciążono stałym momentem oporowym równym $M^* = 0,8M_n$. Zmieniając parametry napięcia wyjściowego przetwornicy, nastawiono wartość prędkości obrotowej silnika na $n^* = 750,0 \text{ obr/min}$. Wyznacz wartość napięcia zasilającego silnik i jego częstotliwość w tym stanie pracy.

Rozwiązanie zadania 2

Z danych znamionowych wynika, że silnik ma $p = 2$ pary biegunów. Zatem jego poślizg znamionowy jest równy

$$s_n = \frac{n_{0n} - n_n}{n_{0n}} = \frac{1500 - 1465}{1500} = 0,02333.$$

Poślizg krytyczny silnika wyniesie

$$s_{kn} = s_n \left(\lambda_n + \sqrt{\lambda_n^2 - 1} \right) = 0,02333 \cdot \left(2,8 + \sqrt{2,8^2 - 1} \right) = 0,1263.$$

Przeciążalność silnika dla $M = 0,8M_n$ wyniesie

$$\lambda = \frac{M_{\max n}}{0,8M_n} = 3,5,$$

a poślizg przy tym obciążeniu

$$s = s_{kn} \left(\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,1263 \cdot \left(3,5 - \sqrt{3,5^2 - 1} \right) = 0,01843.$$

W nowych warunkach pracy przy U^* i f^* zarówno moment krytyczny M_{\max}^* , jak i przeciążalność λ^* nie ulegną zmianie ze względu na to, że jest zachowany stosunek $U^*/f^* = U_n/f_n$. Natomiast nowa wartość poślizgu krytycznego s_k^* wyniesie

$$s_k^* = \frac{R_2}{X_1 + X_2'} \cdot \frac{f_n}{f^*} = s_{kn} \frac{f_n}{f^*}.$$

Zatem poślizg przy U^* , f^* i obciążeniu $M^* = 0,8M_n$ wyniesie

$$s^* = s_{kn} \frac{f_n}{f^*} \left(\lambda^* - \sqrt{\lambda^{*2} - 1} \right) = s \frac{f_n}{f^*}.$$

Z drugiej zaś strony mamy

$$s^* = \frac{n_0^* - n^*}{n_0^*} = \frac{60f^* - pn^*}{60f^*}.$$

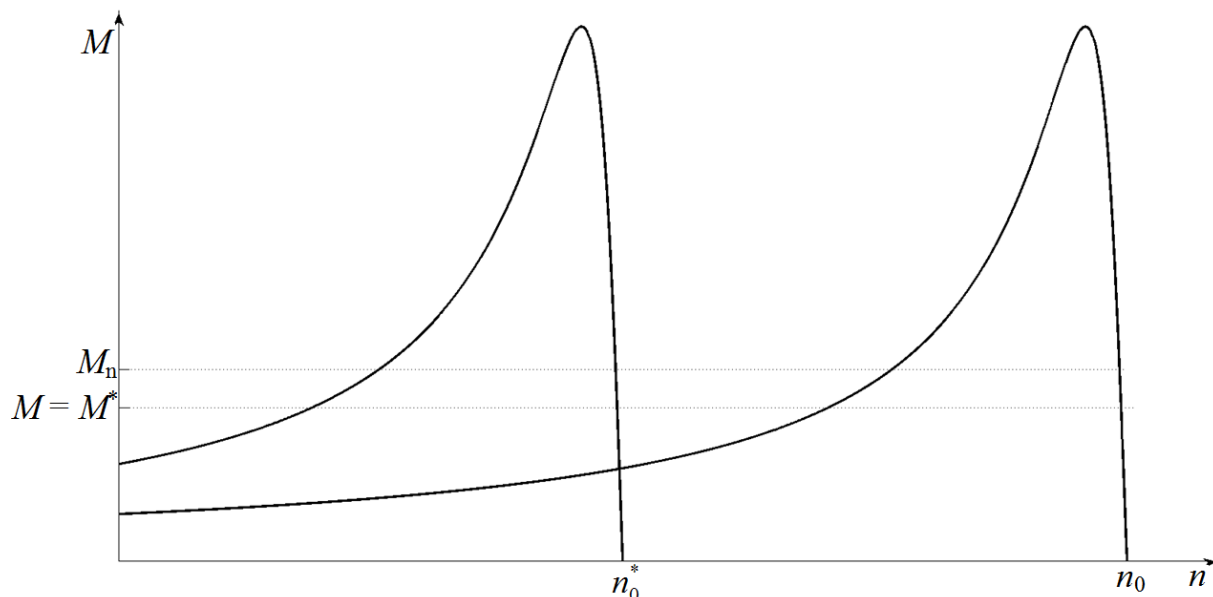
Na podstawie obu powyższych równań można obliczyć poszukiwaną wartość częstotliwości

$$f^* = \frac{pn^*}{60} + sf_n = \frac{2 \cdot 750}{60} + 0,01843 \cdot 50 = 25,92 \text{ Hz}$$

oraz napięcia

$$U^* = U_n \frac{f^*}{f_n} = 400 \cdot \frac{25,92}{50} = 207,4 \text{ V}.$$

Przebiegi charakterystyk mechanicznych przy znamionowych i nowych warunkach zasilania pokazano na rysunku 2R.



Rys. 2R. Charakterystyki mechaniczne silnika

Zadanie to można też rozwiązać innym, dużo prostszym sposobem, wykorzystując równoległość charakterystyk mechanicznych silnika, uzyskiwanych przy stałej wartości momentu maksymalnego silnika (rys. 2R). Równoległość charakterystyk mechanicznych sprawia, że bezwzględne wartości spadków prędkości Δn (wyrażone na przykład w obr/min), spowodowane momentem oporowym o takiej samej wartości, liczone od dowolnej prędkości idealnego biegu jałowego, czyli dla dowolnej częstotliwości napięcia zasilania, są dla określonego momentu oporowego takie same. A zatem wyznaczony spadek prędkości przy obciążeniu $M^* = 0,8M_n$ będzie taki sam zarówno przy zasilaniu silnika napięciem o częstotliwości f_n , jak i przy zasilaniu napięciem o częstotliwości f^* .

$$\Delta n = \Delta n^* = n_{0n} \cdot s = 1500 \cdot 0,01843 = 27,65 \text{ obr/min.}$$

Zatem poszukiwana prędkość idealnego biegu jałowego wyniesie

$$n_0^* = n^* + \Delta n^* = 750 + 27,64 = 777,7 \text{ obr/min.}$$

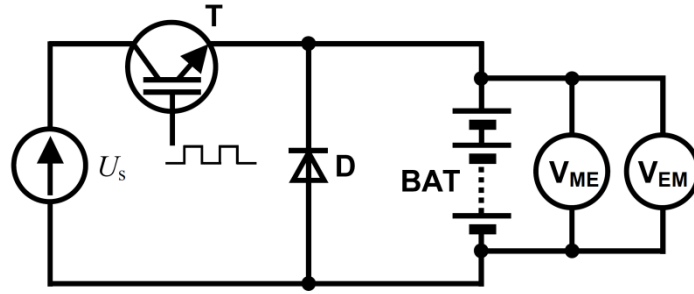
Stąd poszukiwana częstotliwość jest równa

$$f^* = \frac{p \cdot n_0^*}{60} = \frac{2 \cdot 777,7}{60} = 25,92 \text{ Hz.}$$

Natomiast napięcie obliczamy tak samo, jak w pierwszej metodzie.

Zadanie 3

Do ładowania baterii akumulatorów trakcyjnych o napięciu znamionowym 220 V wykorzystano przekształtnik impulsowy DC/DC o częstotliwości przełączania $f_{\text{PWM}} = 1000 \text{ Hz}$, pokazany na rysunku 2. Przekształtnik zasilany jest z sieci prądu stałego o napięciu znamionowym równym $U_s = 300 \text{ V}$. Wyznacz współczynnik wypełnienia impulsów d , przy którym wartość średnia prądu ładowania baterii wyniesie $I_{\text{AV}} = 20 \text{ A}$, oraz wartości napięć, które wskażą idealne woltomierze: elektromagnetyczny i magnetoelektryczny, przyłączone do zaciskach baterii akumulatorów w trakcie jej ładowania. Rezystancja połączeń wewnętrznych przekształtnika wynosi $R_{\text{conv}} = 0,20 \Omega$, spadek napięcia na tranzystorze w stanie przewodzenia jest równy $U_{\text{ECon}} = 2,0 \text{ V}$, spadek napięcia na diodzie w stanie przewodzenia jest równy $U_F = 1,0 \text{ V}$, rezystancja połączeń między przekształtnikiem a baterią wynosi $R_w = 0,2 \Omega$, natomiast rezystancja wewnętrzna baterii jest równa $R_{\text{bat}} = 0,6 \Omega$. Przyjmij, że w czasie ładowania baterii napięcie zasilania i napięcie baterii są stałe i równe wartościom znamionowym.



Rys. 2. Schemat układu zasilania baterii

Rozwiązanie zadania 3

Ze względu na brak dławika w obwodzie przepływu prądu przebieg prądu będzie impulsem prostokątnym o wartości (rys. 3R)

$$I_{\max} = \frac{U_s - U_{EC\text{on}} - U_{\text{bat}}}{R_{\text{conv}} + R_w + R_{\text{bat}}} = \frac{300 - 2,0 - 220}{0,20 + 0,2 + 0,6} = 78,0 \text{ A}.$$

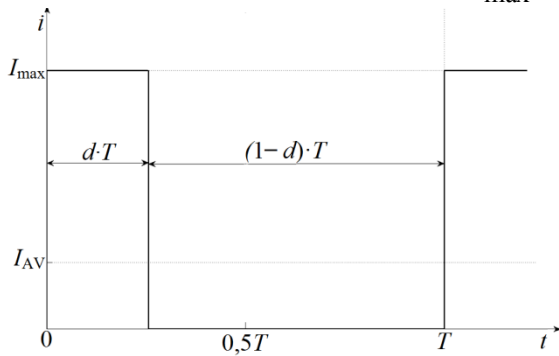
Wartość średnia prądu akumulatora I_{AV} będzie równa

$$I_{\text{AV}} = I_{\max} \cdot \frac{T_{\text{on}}}{T} = I_{\max} \cdot d,$$

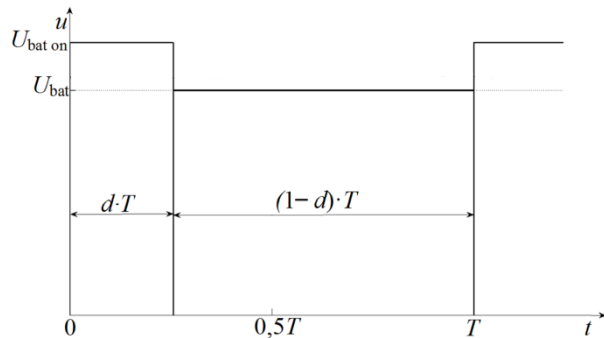
gdzie: T_{on} – czas załączenia tranzystora kluczującego, T – okres impulsowania, d – współczynnik wypełnienia impulsów.

Zatem współczynnik wypełnienia impulsów d będzie równy

$$d = \frac{I_{\text{AV}}}{I_{\max}} = \frac{20}{78,0} = 0,2564.$$



Rys. 3R



Rys. 4R

Przebieg napięcia na zaciskach baterii w trakcie jej ładowania pokazano na rysunku 4R. W czasie załączenia tranzystora kluczującego napięcie na zaciskach baterii będzie równe

$$U_{\text{bat on}} = U_{\text{bat}} + I_{\max} R_{\text{bat}} = 220 + 78,0 \cdot 0,6 = 266,8 \text{ V},$$

natomiast w czasie, gdy tranzystor kluczujący jest wyłączony, napięcie baterii będzie równe jej wartości znamionowej (rys. 4R). Woltomierz magnetoelektryczny pokaże wartość średnią tego napięcia U_{AV} . Ze względu na to, że przebiegi napięć są prostokątne całkowanie można zastąpić mnożeniem

$$U_{\text{AV}} = \frac{\int_0^T u \cdot dt}{T} = \frac{U_{\text{bat on}} T_{\text{on}} + U_{\text{bat}} (T - T_{\text{on}})}{T} = U_{\text{bat on}} d + U_{\text{bat}} (1 - d),$$

$$U_{\text{AV}} = 266,8 \cdot 0,2564 + 220 \cdot (1 - 0,2564) = 232,0 \text{ V}.$$

Woltomierz elektromagnetyczny pokaże natomiast wartość skuteczną napięcia

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\int_0^T u^2 \cdot dt}{T}} = \sqrt{\frac{U_{\text{bat on}}^2 T_{\text{on}} + U_{\text{bat}}^2 (T - T_{\text{on}})}{T}} = \sqrt{U_{\text{bat on}}^2 \cdot d + U_{\text{bat}}^2 (1 - d)},$$

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{(266,8^2 \cdot 0,2564 + 220^2 \cdot (1 - 0,2564))} = 232,9 \text{ V}.$$

Jak widać, przy przewodzeniu przerywanym, wartość maksymalna prądu ładowania jest blisko cztery razy większa od wartości średniej. Nie jest to szkodliwe dla większości akumulatorów (bardzo często w praktyce stosuje się ładowanie prądem przerywanym napięciem wyprostowanym dwupołkowo). O szybkości ładowania decyduje wartość średnia prądu ładowania, natomiast o nagrzewaniu akumulatora wartość skuteczna prądu ładowania. W praktyce takie pulsacje prądu mogą spowodować nadmierne nagrzewanie się akumulatora. Ponadto inaczej niż przy przewodzeniu ciągłym, wartość napięcia na odbiorniku zależy również od napięcia na odbiorniku w chwilach, w których nie ma przepływu prądu. Mała różnica między wartością skuteczną a wartością średnią napięcia na zaciskach baterii spowodowana jest stosunkowo małymi pulsacjami tego napięcia.

Zadanie 4

W stacji transformatorowej 15/0,4 kV suszarni zielonek gospodarstwa rolnego zainstalowano dwa transformatory¹:

a) transformator międzykampanijny o danych:

$S_{\text{na}} = 250 \text{ kVA}$, $U_{1\text{n}} = 15750 \text{ V}^{\pm 2 \times 2,5\%}$, $U_{2\text{n}} = 400 \text{ V}$, Dyn11, $u_{\text{ka}} = 6\%$, $\Delta P_{0\text{a}} = 880 \text{ W}$, $\Delta P_{\text{Cu}75\text{a}} = 3300 \text{ W}$,

oraz b) transformator kampanijny o danych:

$S_{\text{nb}} = 2500 \text{ kVA}$, $U_{1\text{n}} = 15750 \text{ V}^{\pm 2 \times 2,5\%}$, $U_{2\text{n}} = 400 \text{ V}$, Dyn11, $u_{\text{kb}} = 6\%$, $\Delta P_{0\text{b}} = 5000 \text{ W}$, $\Delta P_{\text{Cu}75\text{b}} = 20000 \text{ W}$.

Transformatory pracują na głównym zaczeple przełącznika zaczepów. W tym stanie pracy mają jednakowe napięcia zwarcia, równe znamionowemu napięciu zwarcia, oraz jednakowe przekładnie. W czasie kampanii z powodu deficytu mocy postanowiono do transformatora o większej mocy przyłączyć równolegle transformator o mniejszej mocy. Oblicz współczynnik wykorzystania takiego układu, czyli stosunek mocy, którym można obciążyć układ bez przeciążania któregoś z transformatorów, do sumy algebraicznej mocy znamionowych tych transformatorów.

Rozwiązanie zadania 4

Przy równoległym połączeniu obu transformatorów straty napięcia, czyli zespolone spadki napięcia, na obu transformatorach są sobie równe, czyli

$$\underline{I}_{1\text{a}} \underline{Z}_{\text{ka}} = \underline{I}_{1\text{b}} \underline{Z}_{\text{kb}}, \quad (1)$$

lub w postaci wykładniczej:

$$I_{1\text{a}} Z_{\text{ka}} e^{j(\varphi_{\text{a}} + \varphi_{\text{ka}})} = I_{1\text{b}} Z_{\text{kb}} e^{j(\varphi_{\text{b}} + \varphi_{\text{kb}})}, \quad (2)$$

gdzie: $\underline{I}_{1\text{a}}$, $\underline{I}_{1\text{b}}$ – prądy transformatorów a i b w postaci zespolonej, $\underline{Z}_{\text{ka}}$, $\underline{Z}_{\text{kb}}$ – zespolone impedancje zwarcia obu transformatorów (rys. 5R).

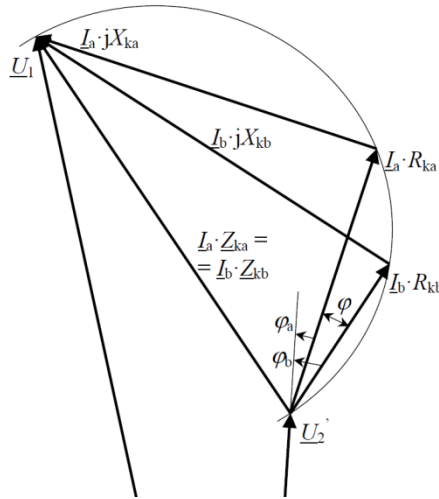
Dwie liczby zespolone przedstawione w postaci wykładniczej są sobie równe, jeżeli ich moduły i argumenty, czyli kąty fazowe, są sobie równe. Sprowadza się to do dwóch równań:

$$I_{1\text{a}} Z_{\text{ka}} = I_{1\text{b}} Z_{\text{kb}}, \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{a}} + \varphi_{\text{ka}} = \varphi_{\text{b}} + \varphi_{\text{kb}}, \quad (4)$$

w których: φ_{a} , φ_{b} – fazy prądów transformatora a i b, φ_{ka} , φ_{kb} – kąty fazowe impedancji zwarcia transformatorów a i b. Z równania (3) i z równości napięć zwarcia obu transformatorów (podanych w założeniach do zadania) wynika fakt, że jeżeli dowolny z transformatorów będzie obciążony prądem znamionowym, to drugi również będzie obciążony prądem znamionowym. Zatem jeżeli $I_{\text{a}} = I_{\text{nb}}$, to $I_{\text{b}} = I_{\text{na}}$, a po pomnożeniu tych równań przez $\sqrt{3} U_1$ możemy również zapisać $S_{\text{a}} = S_{\text{nb}}$ i $S_{\text{b}} = S_{\text{na}}$.

¹ są to oryginalne dane transformatorów żywiczych, suchych typu RESIBLOC® produkcji ABB



Rys. 5R. Fragment wykresu wskazowego

Jednak prądy obu transformatorów nie są ze sobą w fazie i ich suma geometryczna jest mniejsza od ich sumy algebraicznej. Kąt fazowy między wskazami prądów można określić na podstawie równania (4)

$$\varphi = \varphi_a - \varphi_b = \varphi_{kb} - \varphi_{ka}. \quad (5)$$

Jak widać, kąt ten nie zależy od współczynnika mocy obciążenia, ani też od wartości prądów obciążenia i dla danych transformatorów ma stałą wartość.

W celu wyznaczenia kąta φ musimy wyznaczyć kąty fazowe impedancji zwarcia obu transformatorów na podstawie danych znamionowych:

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k},$$

przy czym:

$$R_k = \frac{\Delta P_{Cu75}}{3I_n^2} = \frac{\Delta P_{Cu75}}{3 \cdot \left(\frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} \right)^2} = \Delta P_{Cu75} \frac{U_n^2}{S_n^2},$$

$$Z_k = \frac{u_k U_n}{100 \cdot \sqrt{3} I_n} = \frac{u_k U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} \right)} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n},$$

a stąd

$$\cos \varphi_k = \frac{\Delta P_{Cu75} \frac{U_n^2}{S_n^2}}{\frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}} = \frac{\Delta P_{Cu75}}{\frac{u_k}{100} S_n}.$$

Po podstawieniu danych otrzymano: $\cos \varphi_{ka} = 0,0587$ oraz $\cos \varphi_{kb} = 0,0333$. Stąd na podstawie wzoru (5) kąt między wskazami prądów wynosi:

$$\varphi = \varphi_{kb} - \varphi_{ka} = 87,899^\circ - 86,637^\circ = 1,453^\circ.$$

Współczynniki mocy przy zwarcu transformatorów energetycznych są małe, a więc kąty fazowe impedancji zwarcia są bliskie 90° . Nawet przy współczynnikach mocy przy zwarcu różniących się o 100% różnica kątów fazowych impedancji zwarcia oby transformatorów jest bardzo mała, a zatem i różnica faz prądów tych transformatorów będzie mała.

Prąd wypadkowy I_Σ obu transformatorów będzie równy:

$$I_\Sigma = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + 2I_a I_b \cos \varphi}.$$

Po podstawieniu $I_{1a} = I_{na}$ i $I_{1b} = I_{nb}$ oraz po przemnożeniu przez $\sqrt{3} U_{1n}$ otrzymamy wzór na wypadkową moc zespołu dwóch transformatorów S_Σ (aby zdać sobie sprawę z wpływu analizowanego zjawiska na wynik, podano nieuzasadnioną technicznie liczbę cyfr wyniku)

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{na}^2 + S_{nb}^2 + 2 \cdot S_{na} \cdot S_{nb} \cdot \cos \varphi} = 2749,93 \text{ kVA} ,$$

natomiast współczynnik wykorzystania układu będzie równy

$$d = \frac{S_{\Sigma}}{\Sigma S} = \frac{2749,93}{2500 + 250} = 0,99997 .$$

To oznacza, że nawet przy stosunku mocy znamionowych transformatorów energetycznych pracujących równolegle, wynoszącym 10:1, utrata mocy spowodowana różnicą faz prądów obu transformatorów jest w praktyce bez znaczenia, **o ile tylko napięcia zwarcia tych transformatorów są równe**. Podawana w niektórych podręcznikach informacja, że ograniczenie do 3:1 stosunku mocy znamionowych transformatorów energetycznych pracujących równolegle spowodowane jest występowaniem niewspółfazowości prądów tych transformatorów przy pracy równoległej nie znajduje żadnego uzasadnienia. W rzeczywistości ograniczenie, zalecane przez obowiązującą już od ponad 10 lat normę *PN-IEC 60076-8:2002P, Transformatory – Część 8: Przewodnik stosowania*, wynosi faktycznie 2:1, a nie 3:1, i spowodowane jest **wyłącznie** możliwością zmniejszenia się współczynnika wykorzystania układu na skutek dopuszczalnej tolerancji napięć zwarcia.

Opracował
dr inż. Mirosław Miszewski
PESA Bydgoszcz SA

Sprawdził
dr hab. inż. Sławomir Cieślik
UTP Bydgoszcz

Zatwierdził
Przewodniczący
Rady Naukowej Olimpiady
dr hab. inż. Sławomir Cieślik