

ALEKSANDER ŻYWIEC

Katedra Maszyn Elektrycznych

KOREKTOR NAPIĘCIA  
W UKŁADACH FAZOWEJ KOMPOUNDACJI WZBUDZENIA

Streszczenie. Korektor napięcia zastosowany do układów fazowej kompondacji wzbudzenia zapewnia bezbłędną stabilizację napięcia w każdym punkcie charakterystyki zewnętrznej generatora. W praktyce najczęściej jest stosowany korektor działający jednokierunkowo z transduktorowym członem wykonawczym.

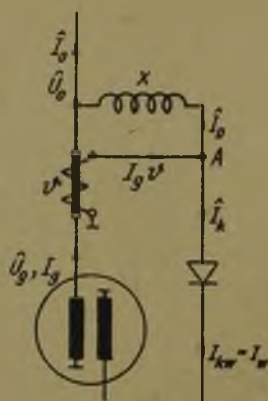
Przeprowadzono szczegółową analizę pracy takiego korektora przyłączonego do podstawowego układu fazowej kompondacji wzbudzenia. Wykazano także, że klasyczne przyłączenie korektora, w którym człon wykonawczy bocznikuje obwód wzbudzenia, nie jest korzystne w stanach nieustalonej pracy generatora. Dlatego w końcowej części przeanalizowano układ ze zmodyfikowanym przyłączeniem korektora do układu kompondacji wykazując, że zapewnia on prawidłową pracę korektora w ustalonych i nieustalonych stanach pracy generatora.

Wprowadzenie

Układy fazowej kompondacji wzbudzenia znalazły powszechne zastosowanie w układach wzbudzenia generatorów synchronicznych małych i średnich mocy pracujących bez wzbudnicy. Ideowy schemat podstawowego układu równoległej fazowej kompondacji wzbudzenia podano na rys.1.

Prąd wyjściowy układu kompondacji  $\hat{I}_k$  płynący w zastępczej impedancji obwodu wzbudzenia  $Z_r$  wynosi:

$$\hat{I}_k = \frac{\hat{U}_o + j\hat{I}_k X_k}{Z_k} \quad (1)$$



Rys. 1. Podstawowy układ równoległej fazowej kompensacji wzbudzenia

gdzie

$$\hat{Z}_r = R_r + jX_p \quad (2)$$

$$\hat{Z}_k = R_r + j(X_p + X) \quad (3)$$

$R_r$  - oporność czynna obwodu wzbudzenia sprowadzona na stronę prądu zmiennego,

$X_p$  - reaktancja wprowadzana przez układ prostowników do obwodu prądu zmiennego,

$X$  - reaktancja dławika układu kompensacji,

$v$  - przekładnia transformatora prądowego,

$\hat{U}_0$  - napięcie w punkcie przyłączenia dławika  $X$ .

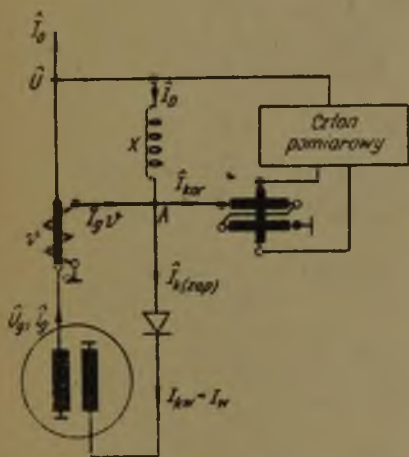
Zazwyczaj narzuca się układowi fazowej kompensacji wzbudzenia warunek dwupunktowej dokładnej stabilizacji napięcia prądnicy: w punkcie biegu jałowego i w punkcie znamionowego obciążenia przy  $\cos \varphi = 0$  ind. [1]. W obliczeniach parametrów elementów układu kompensacji posługujemy się zastępczą reaktancją synchroniczną  $X_{de}$  obliczaną z równania:

$$X_{de} = \frac{I_{wL} - I_{w0}}{I_{w0}} \quad (4)$$

W tym przypadku otrzymamy:

$$v^* = \frac{X_{de}}{X} \quad (5)$$

Do dokładnej stabilizacji napięcia w innych punktach charakterystyki zewnętrznej generatora wyposażonego w układ fazowej kompoundacji wzbudzenia służy dodatkowo korektor napięcia. Korektor ten spełnia zadanie regulatora napięcia. Członem wykonawczym korektora jest wzmacniacz magnetyczny sterowany z członu pomiarowego uczulonego na zmiany napięcia prądnic. Największe zastosowanie znalazł korektor o działaniu jednokierunkowym, który bocznikując obwód kompoundacji zmniejsza prąd wzbudzenia przy wzroście napięcia stabilizowanego powyżej wartości zadanej.



Rys.2. Przyłączenie korektora do podstawowego układu fazowej kompoundacji wzbudzenia

Przyłączenie takiego korektora do podstawowego układu kompoundacji wzbudzenia przedstawia rys.2.

W celu obliczenia prądu wyjściowego korektora poczyniono następujące założenia upraszczające:

- Układ kompoundacji wzbudzenia zapewnia bezbłędną stabilizację napięcia przy maksymalnej temperaturze otoczenia dla dwu, wyżej wspomnianych, punktów pracy prądnic. Prąd korektora w tych dwu punktach jest równy zero.
- Impedancja uzwojeń roboczych transduktora jest czysto indukcyjna.
- Obliczenie prądów kompoundacji i korektora ograniczamy do podstawowej harmonicznej.

d) Prąd kompoundacji jest określony przez reaktancję dławia, która determinuje łączną impedancję obwodu kompoundacji.

Musimy uwzględnić, że na prąd uzwojeń roboczych członu wykonawczego korektora wpływa temperatura otoczenia, błąd w

przekładni transformatora prądowego oraz jawnobiegunowość magnesnicy generatora. Maksymalna wartość prądu korektora wystąpi przy równoczesnym jednokierunkowym wpływie powyższych czynników.

### Wpływ temperatury otoczenia

Jeśli układ fazowej compoundacji wzbudzenia zapewnia dokładną stabilizację napięcia generatora przy maksymalnej temperaturze uzwojeń  $\tau_{max}$ , to przy obniżonej temperaturze  $\tau_{min}$  wystąpi tendencja do powiększenia napięcia prądnic. Wtedy bowiem maleje oporność czynna obwodu wzbudzenia, co z kolei pociąga za sobą wzrost prądu wzbudzenia. Stosunek wyprostowanych prądów compoundacji bez wpływu korekcji  $d_1$  wynosi:

$$d_1 = \frac{I_{kw2}}{I_{kw1}} = \frac{U_{wo\sim 2}}{U_{wo\sim 1}} \frac{R_{r1}}{R_{r2}} \quad (6)$$

gdzie:

$I_{kw}$  - wyprostowany prąd wyjściowy układu compoundacji,

$U_{wo\sim}$  - względne napięcie wzbudzenia przy biegu jałowym generatora,

indeks "1" oznacza odpowiednią wartość w temperaturze maksymalnej  $\tau_{max}$ ,

indeks "2" oznacza odpowiednią wartość w temperaturze minimalnej  $\tau_{min}$ .

### Wpływ uchybu przekładni $v$ transformatora prądowego

Aby umożliwić dokładne zestrojenie układu compoundacji należy na uzwojeniu wtórnym transformatora prądowego przewidzieć zaczepty pozwalające zmieniać przekładnię  $v$  skokowo co  $\Delta$  % (np.  $\Delta = 5\%$ ). Wynika z tego, że w najgorszym przypadku jest możliwy  $\Delta$  - procentowy uchyb w nastawieniu tej przekładni, czemu odpowiada taki sam uchyb wartości składowej prądowej prądu compoundacji od wartości koniecznej do dokładnej stabilizacji napięcia. Zakładając, że przekładnia  $v$  jest o  $\Delta$  % za duża otrzymujemy  $d_2$  - krotne powiększenie prądu wzbudzenia przy pracy bez korektora.

Przy obciążeniu indukcyjnym generatora składowa prądu kompowdacji proporcjonalna do prądu generatora jest w fazie ze składową proporcjonalną do napięcia generatora. Składowe wyprostowanego prądu kompowdacji wynoszą:

składowa napięciowa:

$$I_{kwL\Delta}(U_N) = I_{wo} \quad (7a)$$

składowa prądowa:

$$I_{kwL\Delta}(I_{gN}) = (I_{wL} - I_{wo}) \left(1 + \frac{\Delta}{100}\right) \quad (7b)$$

Wobec tego wyjściowy prąd układu kompowdacji wynosi wtedy:

$$I_{kwL\Delta} = I_{wo} + (I_{wL} - I_{wo}) \left(1 + \frac{\Delta}{100}\right) \quad (8)$$

Gdy nie ma uchybu w nastawieniu przekładni  $\nu$  to:

$$I_{kwL} = (I_{wL} - I_{wo}) + I_{wo} \quad (9)$$

Tak więc powiększenie prądu wzbudzenia przy obciążeniu indukcyjnym prądnicy i pracy bez korektora wynosi:

$$d_{2L} = \frac{I_{kwL\Delta}}{I_{kwL}} = \frac{I_{wo} + (I_{wL} - I_{wo}) \left(1 + \frac{\Delta}{100}\right)}{I_{wL}} \quad (10)$$

gdzie:

$I_{wL}$  - prąd wzbudzenia prądnicy przy znamionowym indukcyjnym obciążeniu,

$I_{wo}$  - prąd wzbudzenia prądnicy przy biegu jałowym,

$\Delta$  - procentowy uchyb przekładni  $\nu$ ,

indeks "L" odnosi się do obciążenia indukcyjnego,

indeks " $\Delta$ " odnosi się do przypadku zaistnienia uchybu w przekładni  $\nu$ .

Przy obciążeniu czynnym generatora składowe prądowa i napięciowa prądu kompowdacji są do siebie prostopadłe, a więc:

$$I_{kwR\Delta} = \sqrt{\left[ (I_{wL} - I_{wo}) \left( 1 + \frac{\Delta}{100} \right) \right]^2 + I_{wo}^2} \quad (11a)$$

$$I_{kwR} = \sqrt{(I_{wL} - I_{wo})^2 + I_{wo}^2} \quad (11b)$$

Wobec tego powiększenie prądu wzbudzenia przy obciążeniu czynnym generatora i pracy bez korektora wynosi:

$$d_{2R} = \sqrt{\frac{\left[ (I_{wL} - I_{wo}) \left( 1 + \frac{\Delta}{100} \right) \right]^2 + I_{wo}^2}{(I_{wL} - I_{wo})^2 + I_{wo}^2}} \quad (12)$$

We wzorach ostatnich indeks "R" odnosi się do obciążenia czynnego generatora.

### Wpływ jawnobiegunowości magnesńicy

Jawnobiegunowość magnesńicy generatora z układem kompowdacji, który zapewnia bezbłędną stabilizację napięcia przy znamionowym indukcyjnym obciążeniu, daje wznoszącą charakterystykę zewnętrzną przy obciążeniu czynnym i czynno-indukcyjnym. Jest to spowodowane tym, że w tych stanach obciążenia zapotrzebowany przez generator prąd wzbudzenia jest mniejszy od prądu dostarczanego przez układ kompowdacji. Różnica powyższych dwu prądów wzbudzenia po stronie prądu zmiennego określa zapotrzebowany prąd uzwojeń członu wykonawczego korektora napięcia.

$$\hat{I}_{kor.j} = \hat{I}_{kR} - \frac{\hat{I}_{wR}}{k_1} \quad (13)$$

gdzie:

$\hat{I}_{kR}$  - prąd dostarczany przez układ kompowandacji przy czynnym obciążeniu generatora,

$\hat{I}_{wR}$  - prąd wzbudzenia prądnicy przy znamionowym czynnym obciążeniu,

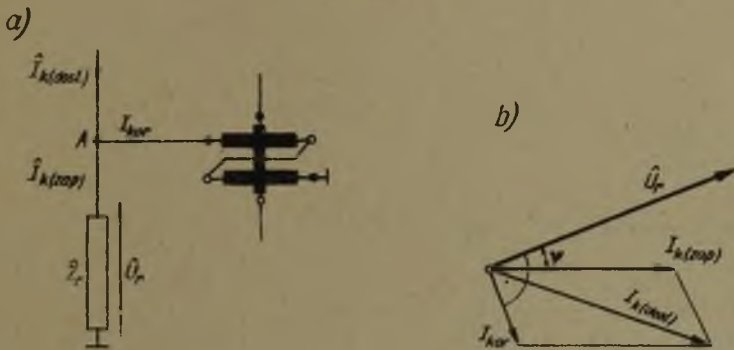
$k_i$  - współczynnik sprowadzający prąd obwodu wzbudzenia na stronę obwodu prądu zmiennego

$$k_i = \frac{I_{ksw}}{I_k} \quad (14)$$

W szerokim zakresie współczynnik  $k_i \cong 1,34$ .

Obliczenie prądu wyjściowego korektora

Wykres wektorowy dla węzła "A" układu kompowandacji z rys.2 przedstawia rys.3b. Na rysunku tym  $Z_T$  jest zastępczą



Rys.3. Rozpływ prądu w punkcie przyłączenia członu wykonawczego korektora

impedancją obwodu wzbudzenia przetransformowaną przez układ prostowników na stronę prądu zmiennego trójfazowego określona równaniem (2). Przy założeniu równoczesnego jednokierunkowego wpływu wszystkich czynników zakłócających otrzymuje się:

Dla indukcyjnego obciążenia generatora:

$$d_L = d_1 d_{2L} \quad (15)$$

$$I_{kL(\text{dost})} = \frac{d_L I_{wL}}{k_{i2}} \quad (16a)$$

$$I_{kL(\text{zap})} = \frac{I_{wL}}{k_{i2}} \quad (16b)$$

$$\sin \psi = \frac{X_p}{\sqrt{X_p^2 + R_r^2}} \quad (16c)$$

Mamy więc:

$$I_{\text{kor.L}} = \frac{I_{wL}}{k_{i2}} \left[ \sqrt{\sin^2 \psi + d_L^2} - 1 - \sin \psi \right] \quad (17)$$

Dla czynnego obciążenia generatora:

$$d_R = d_1 d_{2R} \quad (18)$$

$$I_{kR(\text{dost})} = \frac{d_R}{k_{i2}} \sqrt{(I_{wL} - I_{wo})^2 + I_{wo}^2} \quad (19a)$$

$$I_{kR(\text{zap})} = \frac{I_{wR}}{k_{i2}} \quad (19b)$$



Po przekształceniach otrzymamy:

$$I_{\text{kor.R}} = \frac{1}{k_{i2}} \left\{ \sqrt{d_R^2 [(I_{wL} - I_{wo})^2 + I_{wo}^2] - I_{wR}^2 (1 - \sin^2 \psi) - I_{wR} \sin \psi} \right\} \quad (20)$$

W ostatnich równaniach  $k_{i2}$  jest współczynnikiem sprowadzającym prąd obwodu wzbudzenia na stronę prądu zmiennego, obliczonym dla minimalnej temperatury uzwojeń  $\tau_{\text{min}}$ . Większa z obliczonych wartości prądu korektora  $I_{\text{kor.L}}$ ,  $I_{\text{kor.R}}$  określa moc typową transduktorów członu wykonawczego. Transduktor winien być zaprojektowany na prąd  $I_{\text{kor.max}}$  i napięcie  $U_r$ , czyli na moc wyjściową przypadającą na jedną fazę:

$$S_{\text{kor}} = U_r I_{\text{kor.max}} \quad (21)$$

gdzie:

$U_r$  - napięcie na impedancji  $\hat{Z}_r$  przy maksymalnym prądzie wzbudzenia generatora,

$I_{\text{kor.max}}$  - większa z wartości  $I_{\text{kor.L}}$ ,  $I_{\text{kor.R}}$ .

Przyłączenie korektora jak na rys.2 powoduje pewne niekorzystne właściwości w czasie przebiegów niestabilnych. Aby przekonać się o tym przeanalizujmy zachowanie się układu z rys.2 przy skokowym wzroście prądu obciążenia generatora. Łatwo stwierdzić, że w pierwszej chwili tego zaburzenia napięcie na zaciskach generatora wyposażonego w układ fazowej kompowandacji wzbudzenia maleje do wartości określonej równaniem:

$$\hat{U} = \hat{U}_0 - j \Delta \hat{I}_g X_g \quad (22)$$

gdzie:

$U_0$  - ustalone napięcie odbiornika,

$\Delta I_g$  - przyrost prądu obciążenia generatora o zmienności skokowej,

$X_g$  - reaktancja wstępna generatora.

Czasowe przebiegi napięcia i prądu wykreślono na rys.4. Nagły wzrost prądu obciążenia spowoduje zwiększenie napięcia na zastępczej reaktancji  $\hat{Z}_r$  z wartości

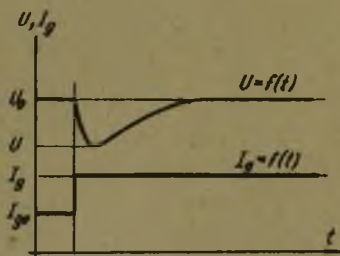
$$\hat{U}_{ro} = \frac{\hat{U}_o + j\hat{I}_{go}X_{de}}{\hat{Z}_k} \hat{Z}_r \quad (23a)$$

do wartości

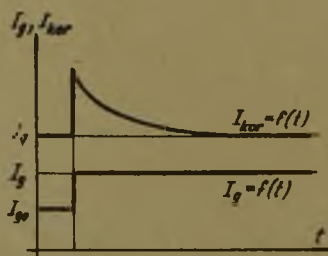
$$\hat{U}_r = \frac{\hat{U}_o + j\hat{I}_g(X_{de} - X_\sigma) + j\hat{I}_{go}X_\sigma}{\hat{Z}_k} \hat{Z}_r \quad (23b)$$

gdzie:

$\hat{I}_{go}$  - ustalony prąd generatora przed zaburzeniem.



Rys.4. Przebieg napięcia twornika przy nagłym wzroście prądu obciążenia generatora wyposażonego w układ kompensacji



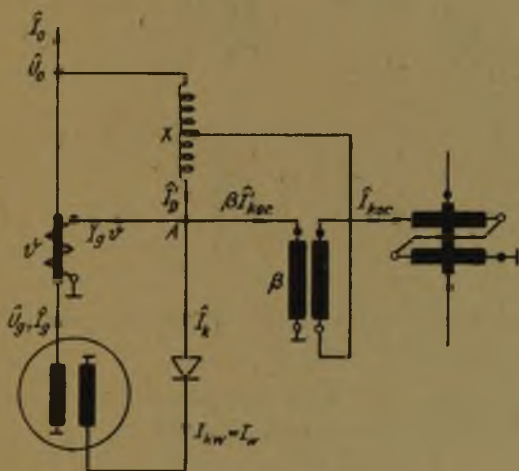
Rys.5. Przebieg prądu korektora przy nagłym wzroście prądu obciążenia generatora

Przy rozpatrywanym zaburzeniu wystąpi przejściowy wzrost prądu uzwojeń roboczych transduktora (rys.5). Wynika to z rozpatrzenia właściwości wzmacniacza magnetycznego przy skokowym wzroście napięcia zasilania obwodu uzwojeń roboczych. W efekcie korektor obniża nadmiernie prąd  $I_k$ , co pociąga za sobą obniżenie prądu wzbudzenia generatora. Takie działanie transduktorowego korektora napięcia nie jest korzystne.

Modyfikacja przyłączenia korektora

Aby uniknąć takich niekorzystnych efektów można zastosować zmodyfikowany sposób przyłączenia korektora do układu kompoundacji. Przy zastosowaniu takiego przyłączenia można utrzymać stałe napięcie zasilania uzwojeń roboczych transduktora w chwili skokowego obciążenia generatora.

Korektor zasilany jest napięciem o pośredniej wartości między napięciem  $U$  oraz  $U_r$ . Ideowy schemat takiego przyłączenia członu wykonawczego korektora do podstawowego równoległego układu fazowej kompoundacji wzbudzenia przedstawia rys.6.



Rys.6. Zmodyfikowany sposób przyłączenia korektora do podstawowego układu kompoundacji wzbudzenia

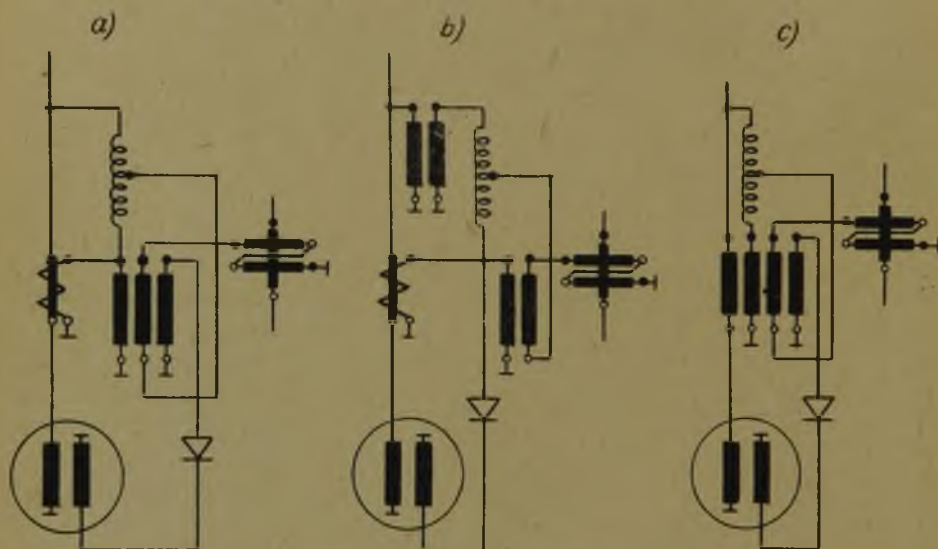
dów fazowej kompoundacji wzbudzenia, tzn. do układów z transformatorem dopasowującym, transformatorem napięciowym i transformatorem kompoundacji. Łatwo zauważyć, że takie przyłączenie wymaga nawinięcia na rdzeniu transformatora dopasowującego czy transformatora kompoundacji dodatkowego uzwojenia, do którego przyłącza się korektor. Przykłady takich układów podano na rys.7.

Obliczenie parametrów elementów układu fazowej kompoundacji ze zmodyfikowanym przyłączeniem korektora nie różni się niczym od obliczenia tych parametrów dla układu bez korektora. Należy dodatkowo przewidzieć zacsep na uzwojeniu dła-

Jeśli zauważymy, że w pierwszej chwili przy wzroście prądu obciążenia generatora maleje spadek napięcia  $U_D$  na reaktancji  $X$  dławika kompoundacji, to zrozumiała jest korzyść wynikająca ze zmodyfikowanego przyłączenia korektora. Przy odpowiednim doborze zacze pu dławika i przekładni dodatkowego transformatora napięcie, do którego przyłączony jest korektor, utrzymuje się na stałej wartości.

Zmodyfikowane przyłączenie korektora można zastosować także do innych pochodnych ukła-

wika, a dla układów z rys.7a, 7c należy ponadto przewidzieć dodatkowe uzwojenie w transformatorze. Pozostałe układy (rys.6 i rys.7b) wymagają zastosowania dodatkowego transformatora pomocniczego.



Rys.7. Zmodyfikowany sposób przyłączenia korektora do układów kompowandacji wzbudzenia:

- a) z transformatorem dopasowującym, b) z transformatorem napięciowym, c) z transformatorem kompowandacji

Przystępując do teoretycznej analizy układu korektora uważamy za narzucone następujące wartości:  $U_{wo}$ ,  $R_r$ ,  $X_p$ ,  $Z_r$ ,  $X$ ,  $X_{de}$ ,  $\alpha = \frac{X_p}{X}$ ,  $\beta = \frac{X_{de}}{X}$ . Poniższe obliczenia odnoszą się bezpośrednio do podstawowego układu fazowej kompowandacji wzbudzenia z rys.6, którego schemat dogodniejszy do rozważań przedstawia rys.8.

Aby zmodyfikowany układ przyłączenia korektora spełniał właściwe swe zadanie należy odpowiednio dobrać przekładnię  $\alpha$  na uzwojeniu dławika kompowandacji oraz przekładnię  $\beta$  dodatkowego transformatora. Przekładnie  $\alpha$  i  $\beta$  można wyznaczyć z warunku stałości napięcia na uzwojeniach członu wykonawczego korektora dla dwu stanów pracy generatora, a mianowicie: dla stanu pracy ustalonej i dla pierwszej chwili przy sko-

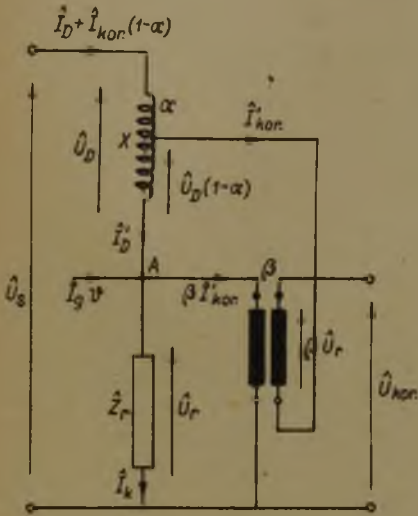
kowym wzroście prądu obciążenia. Jako stan ustalony poprzedzający zaburzenie wzięto stan jałowy ( $I_{go} = 0$ ).

Do dalszej analizy wprowadzamy następujące założenia:

a) rozpatrujemy dławik bez rozprożeń i o pomijalnie małej oporności czynnej; po przyłączeniu korektora do jego zaczepek dławik pracuje jako idealny autotransformator o reaktancji magnesowania  $X$ ,

b) transformator pomocniczy jest transformatorem idealnym.

Napięcie zasilania uzwojeń roboczych korektora wynosi (rys.8):



Rys.8. Schemat zastępczy dla układu z rys.6

$$\hat{U}_{kor.} = \hat{U}_s - \alpha \hat{U}_D + \beta \hat{U}_r \quad (24)$$

Ale

$$\hat{U}_D = \hat{U}_s - \hat{U}_r \quad (24a)$$

więc

$$\hat{U}_{kor.} = \hat{U}_s (1 - \alpha) + \hat{U}_r (\alpha + \beta) \quad (25)$$

a) W ustalonym stanie jałowym:  $\hat{U}_s = \hat{U}_o$

$$\hat{U}_r = \frac{\hat{U}_o}{\hat{Z}_k} \hat{Z}_r \quad (26a)$$

czyli:

$$\hat{U}_{kor.o} = \hat{U}_o \left[ (1 - \alpha) + \frac{\hat{Z}_r}{\hat{Z}_k} (\alpha + \beta) \right] \quad (26b)$$

b) W pierwszej chwili skokowego wzrostu prądu obciążenia:

$$\hat{U}_s = \hat{U}_o - j\hat{I}_g X_\sigma$$

$$\hat{U}_r = \frac{\hat{U}_s + j\hat{I}_k X_v}{\hat{Z}_k} \hat{Z}_r \quad (27a)$$

Po przekształceniu równania (25) otrzymuje się:

$$\hat{U}_{kor.z} = \hat{U}_o \left[ (1-\alpha) + \frac{\hat{Z}_r}{\hat{Z}_k} (\alpha + \beta) \right] + \hat{I}_g \left\{ \frac{\hat{Z}_r}{\hat{Z}_k} X_{de} (\alpha + \beta) - X_\sigma \left[ (1-\alpha) + \frac{\hat{Z}_r}{\hat{Z}_k} (\alpha + \beta) \right] \right\} \quad (27b)$$

Warunek równości napięć  $\hat{U}_{kor.o}$  i  $\hat{U}_{kor.z}$  można rozpatrzyć z punktu widzenia równości modułów [2], albo równości ich wartości symbolicznych z uwzględnieniem kąta rozchyłu tych napięć. Z porównania modułów

$$U_{kor.o} = U_{kor.z} \quad (28)$$

otrzymuje się w postaci uwikłanej związek między przekładnia-  
mi  $\alpha$  i  $\beta$ , parametrami układu fazowej kompowandacji  $\underline{U}_{wo}$ ,  $\kappa$ ,  
 $X_\sigma$ ,  $X_{de}$  i prądem obciążenia generatora  $I_g$ :

$$F = f(\underline{U}_{wo}, \kappa, X_{de}, X_\sigma, I_g) \quad (29a)$$

przy czym

$$F = \frac{1 - \alpha}{\alpha + \beta} \quad (29b)$$

Z równań (29) wynika, że prawidłowe działanie korektora jest możliwe tylko przy założonej wartości skokowego wzrostu prądu obciążenia generatora. Przy innych wartościach prądu zaburzeniowego warunek zgodności modułów nie jest spełniony, na skutek czego pojawia się prąd wyrównawczy w uzwojeniu sterującym transduktorów korektora.

Z warunku równości wartości symbolicznych

$$\hat{U}_{kor.o} = \hat{U}_{kor.z} \quad (30)$$

otrzymuje się na podstawie równań (26b) i (27b):

$$\frac{\hat{Z}_r}{\hat{Z}_k} X_{de} (\alpha + \beta) = X_\sigma \left[ (1 - \alpha) + \frac{\hat{Z}_r}{\hat{Z}_k} (\alpha + \beta) \right] \quad (31a)$$

a po przekształceniach:

$$\alpha \left[ (X_{de} - X_\sigma) \hat{Z}_r + X_\sigma \hat{Z}_k \right] + \beta \hat{Z}_r (X_{de} - X_\sigma) = \hat{Z}_k X_\sigma \quad (31b)$$

Równanie (31b) może być spełnione jeśli przynajmniej jedna z niewiadomych  $\alpha$  lub  $\beta$  jest liczbą zespoloną. Jeśli przyjmiemy za przykładnię  $\alpha$  liczbę rzeczywistą, zaś za przykładnię  $\beta$  liczbę zespoloną otrzymujemy:

$$\alpha \left[ (X_{de} - X_\sigma) \hat{Z}_r + X_\sigma \hat{Z}_k \right] + \beta \hat{Z}_r (X_{de} - X_\sigma) = \hat{Z}_k X_\sigma \quad (32a)$$

Oznaczając:

$$\xi = \frac{X_\sigma}{X_{de} - X_\sigma} \quad (33)$$

otrzymamy:

$$\alpha(\hat{Z}_r + \xi\hat{Z}_k) + \hat{\beta}\hat{Z}_p = \hat{Z}_k\xi \quad (32b)$$

Stąd:

$$\hat{\beta} = \frac{\hat{Z}_k}{\hat{Z}_r} \xi(1 - \alpha) - \alpha \quad (34a)$$

przy czym

$$\frac{\hat{Z}_k}{\hat{Z}_r} = a + jb$$

gdzie

$$a = \frac{R_r^2 + X_p(X_p + X)}{R_r^2 + X_p^2}$$

$$b = \frac{R_r X}{R_r^2 + X_p^2} \quad (35)$$

Więc:

$$\hat{\beta} = [\xi(1 - \alpha)a - \alpha + j \xi(1 - \alpha)b] = \beta e^{j\varphi} \quad (34b)$$

Ostatecznie:

$$\beta = |\hat{\beta}| = \sqrt{[\xi(1 - \alpha)a - \alpha]^2 + [\xi(1 - \alpha)b]^2} \quad (36a)$$

$$\varphi = \text{arc tg} \frac{\xi(1 - \alpha)b}{\xi(1 - \alpha)a - \alpha} \quad (36b)$$



Skrećenie kątowne  $\beta$  względem  $\alpha$  można uzyskać np. przez cykliczną zamianę zacisków transformatora pomocniczego. Rozpatrywany układ trójfazowy pozwoli uzyskać tylko dwie wartości argumentu  $\varphi \neq 0$  a mianowicie:

$\varphi_1 = + 120^\circ$  - kiedy cyklicznie przesuniemy fazy w kierunku matematycznie dodatnim,

$\varphi_2 = - 120^\circ$  - kiedy cyklicznie przesuniemy fazy w kierunku matematycznie ujemnym.

Narzucone wartości kąta  $\varphi$  określają jednoznacznie wartość liczbową przekładni  $\alpha$  zgodnie z równaniem (36b):

$$\alpha = \frac{a \operatorname{tg} \varphi - b}{(a + \frac{1}{b}) \operatorname{tg} \varphi - b} \quad (37)$$

Z obliczeń liczbowych otrzymuje się dwie niezależne wartości przekładni  $\alpha$  dla tego samego układu fazowej kompowandacji wzbudzenia:

$\alpha_1$  - odpowiadające  $\varphi_1$

$\alpha_2$  - odpowiadające  $\varphi_2$

przy czym

$$\alpha_1 > \alpha_2$$

Tym dwóm wartościom przekładni  $\alpha$  odpowiadają, zgodnie z równaniem (36a), również dwie możliwe wartości przekładni transformatora pomocniczego  $\beta$ ;  $\beta_1$  i  $\beta_2$ , przy czym  $\beta_1 < \beta_2$ . Korzystniejszą parę wartości przekładni  $\alpha$  i  $\beta$  otrzymamy z porównania mocy typowej uzwojeń korektora dla obu przypadków. Korzystniejszy jest ten przypadek, w którym wypada mniejsza moc typowa uzwojeń roboczych transduktorów członu wykonawczego korektora.

Jak wykazano wyżej dla uzyskania dokładnej stabilizacji napięcia generatora jest konieczne pobranie z węzła "A" (rys.2 i 6) prądu korekcji  $\hat{I}_{\text{kor}}$ , którego wartość skuteczna jest określona równaniami (17) i (20). Dla zmodyfikowanego

sposobu przyłączenia korektora do układu compoundacji (rys. 6 i 8) obowiązuje równanie:

$$\hat{I}_{kor.} = \hat{I}'_{kor.} (\alpha + \hat{\beta}) \quad (38)$$

w którym  $\hat{I}'_{kor.}$  jest prądem przepływającym przez uzwojenia robocze korektora przy zmodyfikowanym sposobie przyłączenia. A więc:

$$\hat{I}_{kor.} = \frac{\hat{I}'_{kor.}}{\alpha + \hat{\beta}} \quad (38a)$$

Uwzględniając, że napięcie na uzwojeniach korektora można wyrazić równaniem (22b) moc typowa uzwojenia roboczego jednej fazy transduktora wynosi:

$$S'_{kor.} = \left| \hat{U}_{kor.o} \hat{I}'_{kor.} \right| \quad (39a)$$

Po wstawieniu i przekształceniu otrzymamy:

$$S'_{kor.} = \left| \hat{U}_o \hat{I}_{kor.} \left( \frac{1 - \alpha}{\alpha + \hat{\beta}} + \frac{\hat{Z}_r}{\hat{Z}_k} \right) \right| \quad (39b)$$

W ostatnim równaniu wielkości  $\hat{U}_o$ ,  $\hat{I}_{kor.}$ ,  $\hat{Z}_r$ ,  $\hat{Z}_k$  są wielkościami narzuconymi przez parametry generatora. Moc typowa  $S'_{kor.}$  wypada tym mniejsza im mniejszy jest współczynnik:

$$K = \left| \frac{1 - \alpha}{\alpha + \hat{\beta}} + \frac{\hat{Z}_r}{\hat{Z}_k} \right| \quad (40)$$

Ponieważ wartości bezwzględne przekładni  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  i  $\hat{\beta}_1$ ,  $\hat{\beta}_2$  są zbliżone można przyjąć przy ocenie korzystniejszego układu połączeń, że  $\hat{\beta}_1$  i  $\hat{\beta}_2$  różnią się tylko znakiem

części urojonej. W konsekwencji wyrażenie  $\frac{1-\alpha}{\alpha+\beta}$  dla obu przypadków "1" i "2" ma zbliżone części rzeczywiste a części urojone różnią się tylko znakiem, przy czym część urojona ma:

znak "+" dla przypadku oznaczonego indeksem "2" ( $\alpha_2, \hat{\beta}_2$ )

znak "-" dla przypadku oznaczonego indeksem "1" ( $\alpha_1, \hat{\beta}_1$ )

Jeśli zauważyć, że wyrażenie  $\frac{\hat{\beta}_2}{Z_k}$  jest wyrażeniem typu A-jB

to z powyższego rozumowania wynika, że dla przypadku "2" otrzymuje się mniejszą wartość współczynnika K i w efekcie mniejszą moc typową uzwojeń roboczych korektora.

Korzystniejszy jest zatem układ połączeń przy  $\varphi_2 = -120^\circ$ , któremu odpowiadają wyznaczone z równań (36a) i (37) przekładnie  $\alpha_2$  oraz  $\beta_2$ .

Na załączonym wykresie (rys. 9) podano wartości liczbowe przekładni zwojowych  $\alpha_2 = f_1(\underline{X}_{de}, \underline{X}_\sigma)$ ;  $\beta_2 = f_2(\underline{X}_{de}, \underline{X}_\sigma)$  obliczone z równań (36a) i (37) dla podstawowego układu fazowej kompowandacji wzbudzenia, którego parametry dobrano z warunku uzyskania minimalnej sumarycznej mocy typowej uzwojeń poszczególnych elementów składowych układu kompowandacji<sup>1)</sup>. Schemat przyłączenia korektora do tego układu (schemat trójfazowy) przedstawiono na rys.10. Przy obliczaniu mocy typowej uzwojenia roboczego transduktora założono w równaniu (39a), że impedancja wewnętrzna źródła zasilania transduktora jest pomijalnie mała. Przeprowadzimy obliczenia tej impedancji wewnętrznej w celu sprawdzenia dopuszczalności tego założenia. Impedancję wewnętrzną obliczymy korzystając z metody Thevenin'a:

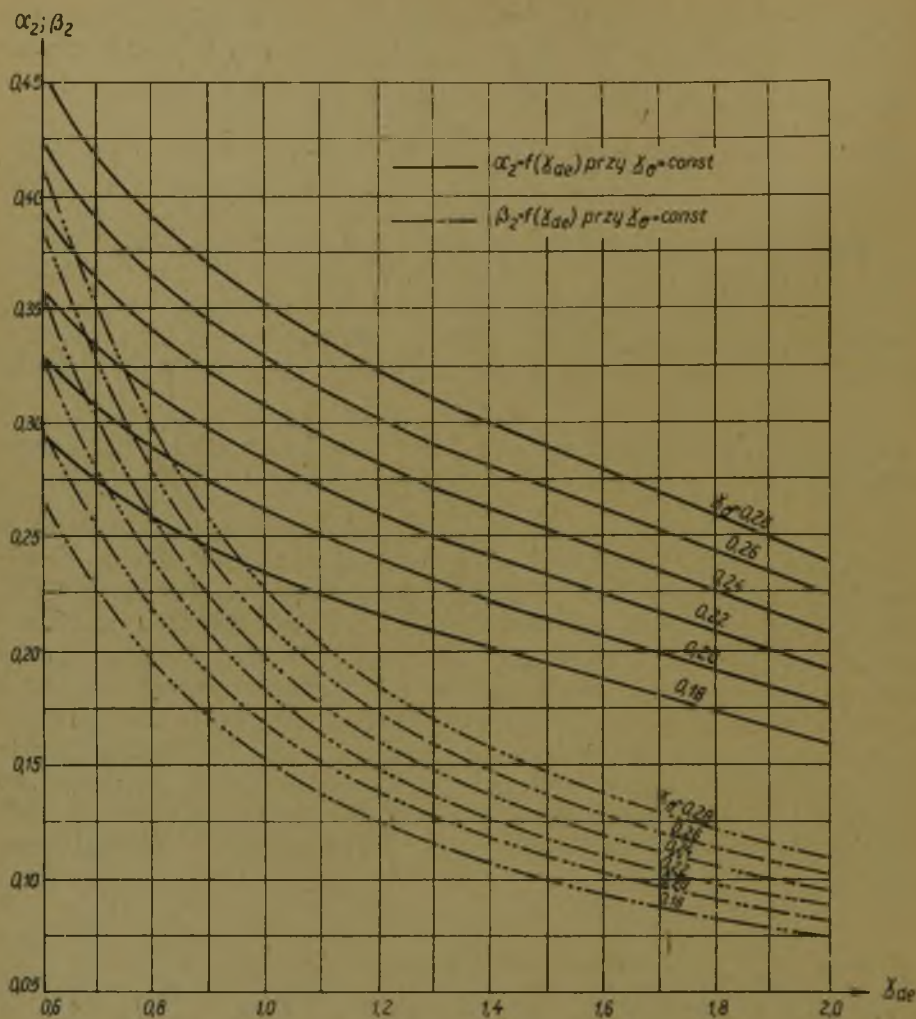
$$\hat{Z}_z = \frac{\hat{U}_{kor.o}}{\hat{I}'_{kor.z}} \quad (41)$$

gdzie:

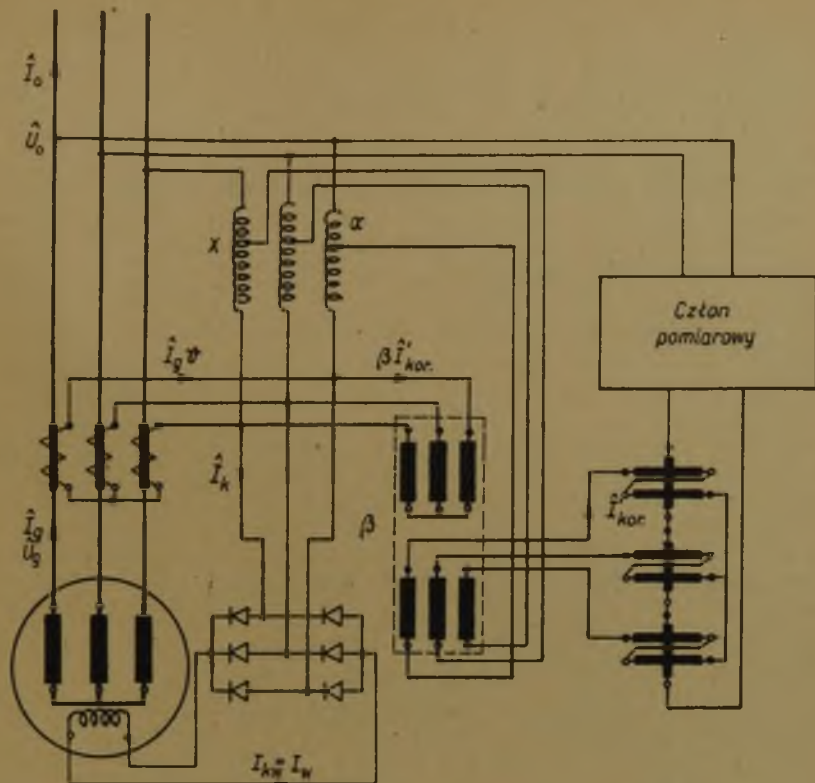
$\hat{U}_{kor.o}$  - napięcie stanu jałowego (przy  $I'_{kor.} = 0$ ),

$\hat{I}'_{kor.z}$  - prąd przy zwarcie uzwojeń korektora.

<sup>1)</sup> Moce typowe są tutaj równe mocy pozornej poszczególnych elementów układu kompowandacji dla przypadku uzyskania krotności prądu zwarcia prądnic  $I_z = 4$ .



Rys. 9. Wartości przekładni  $\alpha_2$  i  $\beta_2$  dla zmodyfikowanego sposobu przyłączenia korektora do podstawowego układu compoundacji wzbudzenia



Rys.10. Trójfazowy schemat zmodyfikowanego przyłączenia korektora (dla przypadku "2") do podstawowego układu kompuandacji wzbudzenia

Napięcie  $\hat{U}'_{kor.o}$  obliczymy z równania (26b).

Prąd  $\hat{i}'_{kor.z}$  obliczamy następująco:

Dla  $I^g = 0$  równanie węzłowe dla punktu "A" (rys.8) ma postać:

$$\hat{i}'_D = \hat{\beta} \hat{i}'_{kor.z} + \hat{i}'_k \quad (42a)$$

Ponadto

$$\hat{i}'_D = \frac{\hat{U}'_D}{jX} - \hat{i}'_{kor.z} \alpha \quad (42b)$$

więc:

$$\hat{I}'_k = \frac{\hat{U}_D}{jX} - \hat{I}'_{kor.z} (\alpha + \beta) \quad (43)$$

W stanie zwarcia uzwojeń korektora obowiązuje zależność:

$$\hat{U}_r + \hat{U}_D (1 - \alpha) + \hat{\beta} \hat{U}_r = 0 \quad (44a)$$

stąd:

$$\hat{I}'_k = \frac{\hat{U}_r}{\hat{Z}_r} = \frac{\hat{U}_D}{\hat{Z}_r} \frac{\alpha - 1}{1 + \hat{\beta}} \quad (44b)$$

Z porównania równań (43) i (44b) otrzymamy:

$$\hat{I}'_{kor.z} = \frac{\hat{U}_D}{\alpha + \hat{\beta}} \left[ \frac{1}{jX} + \frac{1 - \alpha}{(1 + \hat{\beta}) \hat{Z}_r} \right] \quad (45a)$$

Przekształcając równanie (24a) otrzymamy:

$$\hat{U}_s = \hat{U}_D + \hat{U}_r = \hat{U}_D \left( 1 + \frac{\alpha - 1}{1 + \hat{\beta}} \right) = \hat{U}_D \frac{\alpha + \hat{\beta}}{1 + \hat{\beta}} \quad (45b)$$

Po wstawieniu do (45a) otrzymuje się:

$$\hat{I}'_{kor.z} = \hat{U}_o \frac{1}{(\alpha + \hat{\beta})^2} \left( \frac{1 + \hat{\beta}}{jX} + \frac{1 - \alpha}{\hat{Z}_r} \right) \quad (45c)$$

Zastępczą impedancję wewnętrzną  $\hat{Z}_z$  obliczamy z równań (41), (26b) i (45o) otrzymując:

$$\hat{Z}_z = \frac{jX\hat{Z}_r \left[ (1 - \alpha) + \frac{\hat{Z}_r}{Z_k}(\alpha + \hat{\beta}) \right]}{(1 + \hat{\beta})\hat{Z}_r + jX(1 - \alpha)} (\alpha + \hat{\beta})^2 \quad (46)$$

Ponieważ we wszystkich układach kompowdacji wzbudzenia  $Z_r \ll Z_k$  więc

$$\frac{\hat{Z}_r}{Z_k} \approx 0.$$

Otrzymamy więc:

$$\hat{Z}_z \approx \frac{jX\hat{Z}_r (1 - \alpha)(\alpha + \hat{\beta})^2}{(1 + \hat{\beta})\hat{Z}_r - jX(1 - \alpha)} \quad (46a)$$

Należy także zauważyć, że  $\frac{Z_r}{X} \ll 1$ , czyli  $(1 + \hat{\beta})\frac{\hat{Z}_r}{X} \approx 0$  więc ostatecznie:

$$\hat{Z}_z \approx -\hat{Z}_r(\alpha + \hat{\beta})^2 \quad (46b)$$

Z przybliżonego wyrażenia (46b) wynika, że impedancja wewnętrzna źródła zasilania członu wykonawczego korektora jest znikomo mała i może być pominięta.

Wpłynęło do redakcji w maju 1962.

## LITERATURA

- [1] P a s z e k W.: Stabilizacja napięcia samowzbudnych generatorów synchronicznych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Elektryka 8 (praca habilitacyjna).
- [2] D r o s t e W., J a n z e n H.: Dreiphasige Transduktoren für die zusätzliche Spannungsregelung kompoundierter Synchrongeneratoren. AEG Mitl. 10/11 1959.



КОРРЕКТОР НАПРЯЖЕНИЯ В СХЕМАХ ФАЗНОГО  
КОМПАУНДИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Работа относится к корректору напряжения, действующего в одном направлении с исполнительным трансдукторным членом. Проведен подробный анализ работы такого корректора, присоединенного к основной схеме фазного компаундирования. Показано, что классическое присоединение корректора, в котором исполнительный член шунтирует контур возбуждения, имеет свои недостатки в переходных процессах. Автором предложена модификация схемы, обуславливающая правильную работу в стационарном режиме и при переходных явлениях.

CORRECTEUR DE TENSION DANS LES DISPOSITIFS  
DE COMPOUNDAGE DE PHASE D'EXCITATION

L'auteur s'occupe d'un correcteur de tension muni d'un élément de transfert aux transducteurs, fonctionnant dans un sens. Il analyse en détail le fonctionnement d'un tel correcteur branché à un dispositif de compoundage de phase et démontre certains défauts du schéma classique pendant les périodes transitoires. Il propose enfin une certaine modification du schéma, qui assure un fonctionnement satisfaisant pendant les états statiques aussi que pendant les phénomènes transitoires.