

ZYGMUNT KUCZEWSKI

Katedra Napędu Elektrycznego

MASZYNOWA KOMPENSACJA SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH

Streszczenie. W pracy omówiono proste metody kompensowania silników asynchronicznych dużej mocy przy zastosowaniu maszyn komutatorowych prądu zmiennego. Porównano wskaźniki energetyczne i mechaniczne silników napędowych przy różnych metodach kompensacji.

1. Rozważania ogólne

Najczęściej spotykanym napędem elektrycznym jest trójfazowy silnik asynchroniczny. Niski koszt inwestycyjny i łatwość obsługi daje pierwszeństwo silnikom asynchronicznym przed innymi maszynami napędzającymi. Przy swoich dużych zaletach, wadą silnika asynchronicznego jest pobór ze sieci mocy biernej indukcyjnej. Ze względu na tę niedoskonałość silnika asynchronicznego, w wielu wypadkach, szczególnie przy dużych mocach od kilkuset kW wzwyż, stosuje się czasami silniki synchroniczne. Jednakże silniki synchroniczne posiadają mniejszą przeciążalność momentem od silników asynchronicznych i z tego względu, w przypadkach gdy moment obciążeniowy zmienia swoją wartość w dużych granicach jak np. w kopalnianych maszynach wyciągowych, w walcarkach nienawrotnych itp., instaluje się z konieczności jednostki przewymiarowane.

Silnik asynchroniczny może nie pobierać mocy biernej indukcyjnej ze sieci jeżeli zastosuje się do niego wzbudnicę, tzn. jeśli doprowadzać się będzie moc magnesująca od strony wirnika z osobnego źródła. Wprowadzenie wzbudnicy w obwód wirnika silnika asynchronicznego daje jeszcze tę korzyść, że powiększa się moment krytyczny silnika.

Strumień główny silnika asynchronicznego będzie ten sam jeśli przepływ magnetyczny strony wtórnej będzie równy prze-

plywowi magnetycznemu strony pierwotnej, czyli $I_{z_1} = I_{z_2}$. Moc magnesująca po stronie stojana będzie określona zależnością: $Q_{1m} = \sqrt{3} E_1 I_{1m}$. Analogicznie dla obwodu wirnika $Q_{2m} = \sqrt{3} E_2 I_{2m}$. Ponieważ $E_2 = E_{20} s$, zaś $E_{20} = E_1 \frac{z_2}{z_1}$, to $Q_{2m} = \sqrt{3} E_1 I_{1m} s$. Stosunek mocy magnesujących dla rozpatrywanego przypadku:

$$\frac{Q_{2m}}{Q_{1m}} = s$$

Dla otrzymania tego samego efektu magnetycznego moc magnesująca jaką należy dostarczyć od strony wirnika, wynosi tylko kilka procent mocy biernej dostarczonej od strony stojana.

Wzbudnice stosuje się do silników asynchronicznych pierścieniowych o mocach od kilkuset kW wzwyż.

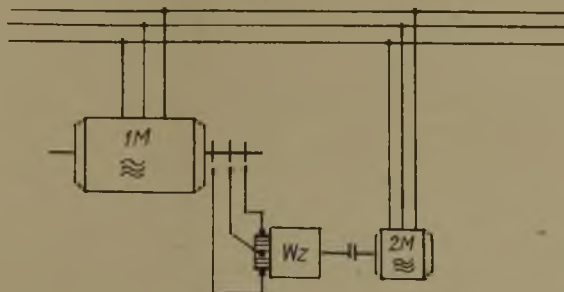
Wzbudnica silnika asynchronicznego jest maszyną komutatorową trójfazową. Wzbudnice dzielą się na samowzbudne i obcowzbudne. Do wzbudnic samowzbudnych zaliczamy przesuwnik fazowy Leblanc-Scherbiusa, przesuwnik Koziska, Nehlsena, Schmitza itp. Wzbudnicą obcowzbudną jest przetwornica częstotliwości.

Z pośród wzbudnic samowzbudnych przesuwnik fazowy Leblanc-Scherbiusa jest najprostszą i najtańszą wzbudnicą. Jednakże w stosunku do wszystkich innych wzbudnic posiada ona tę wadę, że kompensuje silnik asynchroniczny do $\cos \varphi = 1$ dopiero od pewnego obciążenia, bliskiego znamionowemu. W tym przypadku, przy biegu jałowym silnik asynchroniczny zachowuje się tak jakby wzbudnicy nie było. Przesuwnik fazowy Leblanc-Scherbiusa jest maszyną komutatorową trójfazową bezstojanową o jednym uzwojeniu umieszczonym w zamkniętych żłobkach wirnika.

Wszystkie pozostałe wzbudnice samowzbudne są maszynami komutatorowymi z uzwojonym stojanem i wirnikiem i dlatego koszt tych wzbudnic jest większy od kosztu bezstojanowego przesuwnika Leblanc-Scherbiusa. Wzbudnice samowzbudne wielouzwojeniowe kompensują silnik asynchroniczny również i przy małych obciążeniach.

Ponieważ prędkość obrotowa wzbudnic samowzbudnych jest niezależna od prędkości obrotowej głównego silnika asynchronicznego, wzbudnice te mogą być napędzane przez osobny silnik napędowy.

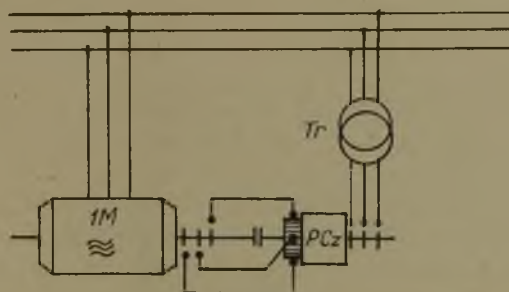
Schemat połączeń wzbudnicy samowzbudnej z głównym silnikiem asynchronicznym podany jest na rys.1.



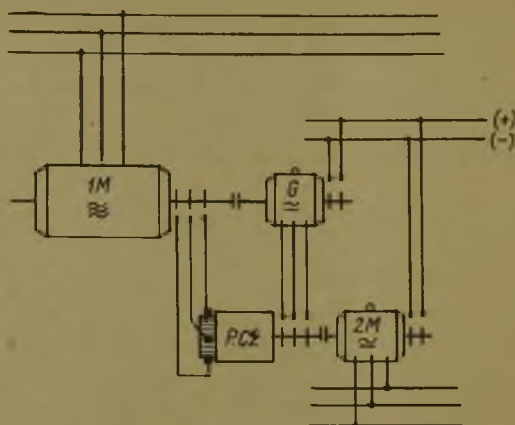
Rys.1. Schemat połączeń silnika asynchronicznego ze wzbudnicą samowzbudną

1M - główny silnik asynchroniczny, Wz - wzbudnica samowzbudna, 2M - silnik asynchroniczny napędzający wzbudnicę

Wzbudnica obcowzbudna - przetwornica częstotliwości, zasilana z osobnego źródła napięcia musi posiadać określoną prędkość obrotową, związaną z prędkością obrotową głównego silnika asynchronicznego. Dwa przykłady połączenia przetwornicy częstotliwości z silnikiem asynchronicznym podane są na rys.2 i rys.3.



Rys.2. Schemat połączeń silnika asynchronicznego ze wzbudnicą obcowzbudną - przetwornicą częstotliwości. Przetwornica częstotliwości połączona mechanicznie z silnikiem głównym
 1M - główny silnik asynchroniczny, P Cz - przetwornica częstotliwości, Tr - transformator regulacyjny



Rys.3. Schemat połączeń silnika asynchronicznego ze wzbudnicą obcowzbudną - przetwornicą częstotliwości. Przetwornica częstotliwości połączona elektrycznie z silnikiem głównym

1M - główny silnik asynchroniczny, 2M - silnik synchroniczny napędzający wzbudnicę, G - prądnica synchroniczna, P Cz - przetwornica częstotliwości

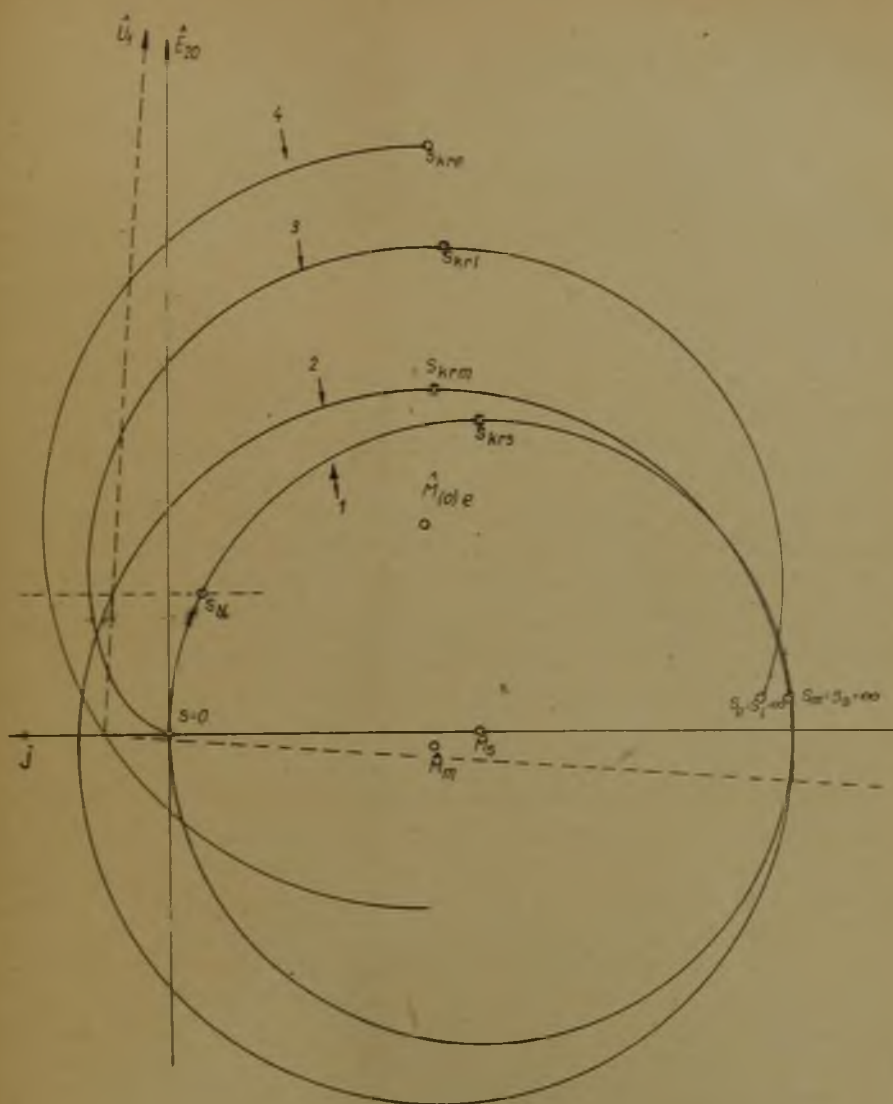
2. Miejsca geometryczne prądu silnika asynchronicznego

Na rys. nr 4 podano wykresy miejsc geometrycznych prądu silnika asynchronicznego trójfazowego pierścieniowego o mocy znamionowej $P_N = 1550 \text{ kW}$ i prędkości synchronicznej $n_0 = 250 \text{ obr/min}$.

° Krzywa 1 przedstawia miejsca geometryczne prądu silnika asynchronicznego przy zwartym uzwojeniu wirnika.

Krzywa 3 obrazuje tę samą zależność, ale dla przypadku, gdy do obwodu wtórnego silnika asynchronicznego podłączona jest wzbudnica samowzbudna typu Leblanc-Scherbiusa (układ połączeń podany jest na rys. nr 1).

Krzywe 2 i 4 przedstawiają miejsca geometryczne prądu tego samego silnika asynchronicznego z podłączoną do obwodu wirnika wzbudnicą obcowzbudną - przetwornicą częstotliwości. Krzywa 2 jest dla przypadku, gdy przetwornica częstotliwości jest mechanicznie połączona z silnikiem głównym (układ połączeń pokazany jest na rys. nr 2), zaś krzywa 4 - dla przypadku, gdy ta sama przetwornica zostanie połączona tylko elektrycznie z silnikiem głównym (układ połączeń pokazany jest na rys. nr 3). Krzywe 2 i 4 wyznaczono przy założeniu, że



Rys.4. Miejsca geometryczne prądu silnika asynchronicznego trójfazowego pierścieniowego

krzywa 1 - przy zwartym uzwojeniu wirnika, krzywa 2 - przy mechanicznie przyłączonej przetwornicy częstotliwości, krzywa 3 - przy przyłączonym przesuwniku fazowym Leblanc-Scherbiusa, krzywa 4 - przy elektrycznie przyłączonej przetwornicy częstotliwości

napięcie dodatkowe przyłożone do pierścienia przetwornicy częstotliwości posiada tę samą amplitudę.

3. Wskaźniki mechaniczno-energetyczne silnika asynchronicznego pierścieniowego pracującego ze wzбудnica

W tabeli nr 1 porównano własności silnika asynchronicznego o danych $P_{II} = 1550 \text{ kW}$, $n_{II} = 247 \text{ obr/min}$, $\cos \varphi_{II} = 0,82 \text{ ind.}$ kompensowanego przy pomocy przesuwnika fazowego Leblanc-Scherbiusa, kompensowanego przy pomocy bezstojanowej przetwornicy częstotliwości połączonej mechanicznie z głównym silnikiem asynchronicznym i kompensowanego przy pomocy tej samej przetwornicy częstotliwości ale połączonej tylko elektrycznie z silnikiem głównym. Dane w tabeli nr 1 obowiązują dla przypadku, gdy dodatkowe napięcie wprowadzone w obwód wirnika silnika asynchronicznego nie powoduje zmiany prędkości obrotowej silnika przy biegu jałowym. Do punktu 5 tabeli nr 1, określającego koszt kompensacji silnika asynchronicznego, można podać na podstawie literatury (13), że skompensowanie jednego KVAr mocy biernej przy pomocy baterii kondensatorów związane jest ze stratami mocy czynnej $3 \div 5 \text{ W}$. Wynika stąd, że koszt kompensowania silnika asynchronicznego przy pomocy wzбудnica, nie jest wiele większy od kosztu kompensowania tego silnika przy pomocy baterii kondensatorów.

4. Silnik asynchroniczny ze wzбудnica, a silnik synchroniczny

W tabeli nr 2 porównano własności silnika asynchronicznego, kompensowanego przy pomocy bezstojanowej przetwornicy częstotliwości połączonej mechanicznie z silnikiem głównym i silnika synchronicznego. Do porównania wskaźników eksploatacyjnych przyjęto silnik asynchroniczny o danych $P_{II} = 1550 \text{ kW}$, $n_{II} = 247 \text{ obr/min}$, $\cos \varphi_{II} = 0,82 \text{ ind.}$, $\eta_{II} = 94,5\%$ i silnik synchroniczny o danych $S_{III} = 1600 \text{ kVA}$, $n_{III} = 250 \text{ obr/min}$, $\cos \varphi_{III} = 1$, $\eta_{III} = 96,5\%$. Wielkość dodatkowego napięcia wprowadzonego w obwód wirnika silnika asynchronicznego dobrano tak, aby przy obciążeniu znamionowym współczynnik mocy silnika asynchronicznego $\cos \varphi = 1$.

Tabela 1

Lp.	Wyszczególnienie	Silnik asynchroniczny połączony ze wzbudnicą samowzbudną - przesuwnikiem Leblano-Scherbiusa	Silnik asynchroniczny połączony z bezstojanową przetwornicą częstotliwości - połączenie mechaniczne	Silnik asynchroniczny połączony z bezstojanową przetwornicą częstotliwości - połączenie elektryczne
1.	Zmiana mocy biernej indukcyjnej wydawanej do sieci przez silnik asynchroniczny przy zmianie obciążenia od biegu jałowego do znamionowego	Przy biegu jałowym silnik zachowuje się tak samo jak niekompensowany. Ze wzrostem obciążenia maleje moc bierna indukcyjna pobierana ze sieci. W pobliżu punktu znamionowego silnik pracuje przy $\cos\varphi$ bliskim 1	Moc bierna indukcyjna wydawana przez silnik do sieci maleje ze wzrostem obciążenia	Moc bierna indukcyjna wydawana przez silnik rośnie ze wzrostem obciążenia
2.	Straty silnika asynchronicznego przy obciążeniu momentem znamionowym ΔP_{as}	Przy $\cos\varphi_N = 1$ straty silnika asynchronicznego przy obciążeniu znamionowym są mniejsze od strat znamionowych	Przy $\cos\varphi_N = 1$ straty silnika asynchronicznego przy obciążeniu znamionowym są mniejsze od strat znamionowych	Zakładając, że przy biegu jałowym silnik asynchroniczny nie pobiera ze sieci mocy biernej ($Q = 0$), straty silnika asynchronicznego przy obciążeniu znamionowym są nieco większe od strat znamionowych
3.	Przeciążalność momentem silnika asynchronicznego $p = \frac{M_{kr}}{M_N}$ Przeciążalność momentem silnika asynchronicznego przy zwartym uzwojeniu wirnika wynosi $p = 2,58$	$p_L = 4,24$	$p_m = 2,82$ Przy założeniu, że obwody magnetyczne maszyn są nienasycone	$p_e = 5,11$ Przy założeniu, że obwody magnetyczne maszyn są nienasycone
4.	Stromość charakterystyki mechanicznej silnika asynchronicznego dla poślizgów mniejszych od krytycznego	Stromość charakterystyki jest nieco mniejsza niż przy silniku asynchronicznym ze zwartym uzwojeniem wirnika	Stromość charakterystyki jest taka sama jak przy silniku asynchronicznym ze zwartym uzwojeniem wirnika	Stromość charakterystyki jest nieco mniejsza niż przy silniku asynchronicznym ze zwartym uzwojeniem wirnika
5.	Dodatkowe straty układu na 1 kVAr mocy biernej skompensowanej przy obciążeniu znamionowym silnika asynchronicznego $P_N = 1550$ kW, $n_N = 247$ obr/min	Zakładając, że przy obciążeniu znamionowym silnik asynchroniczny nie pobiera ze sieci mocy biernej $\xi_L = \frac{\Sigma \Delta P_{dod}}{\Sigma Q} = 6,03 \frac{W}{kVAr}$	Zakładając, że przy obciążeniu znamionowym silnik asynchroniczny nie pobiera ze sieci mocy biernej $\xi_m = \frac{\Sigma \Delta P_{dod}}{\Sigma Q} = 5,51 \frac{W}{kVAr}$	Zakładając, że przy biegu jałowym silnik asynchroniczny nie pobiera ze sieci mocy biernej $\xi_e = \frac{\Sigma \Delta P_{dod}}{\Sigma Q} = 11,07 \frac{W}{kVAr}$
6.	Dodatkowe urządzenia jakie należy zainstalować w celu stworzenia układu	<ol style="list-style-type: none"> Przesuwnik fazowy Leblanc-Scherbiusa Silnik asynchroniczny dwuklatkowy $P_N = 2$ kW do napędzenia wzbudnicy Jeden przełącznik w obwodzie wirnika silnika asynchronicznego 	<ol style="list-style-type: none"> Bezstojanowa przetwornica częstotliwości Transformator trójfazowy o mocy rzędu kilkunastu kVA Jeden wyłącznik po stronie pierwotnej transformatora Jeden przełącznik w obwodzie wirnika silnika asynchronicznego 	<ol style="list-style-type: none"> Bezstojanowa przetwornica częstotli. Prądnicza synchroniczna o mocy kilkunastu kVA Silnik synchroniczny o mocy 3 kW Jeden przełącznik w obwodzie wirnika silnika asynchronicznego Źródło prądu stałego do zasilania obwodów wzbudzenia prądnic i silnika synchronicznego

Tabela 2

Lp.	Wyszczególnienie	Silnik synchroniczny	Silnik asynchroniczny z mechanicznie połączoną bezstojanową przetwornicą częstotl
1	Moc bierna pobierana ze sieci przy obciążeniu znamionowym	$Q_{SN} = 0$	$Q_{aIN} = 0$
2	Moc bierna indukcyjna wydawana przez silnik przy biegu jałowym	Q_{so}	$Q_{ao} = 0,615 Q_{so}$
3	Statyczna przeciążalność momentem $p = \frac{M}{M_n}$	$p_s = 1,8$	$p_a = 2,82$
4	Sprawność całego układu przy obciążeniu znamionowym	$\eta_{SN} = 0,958$	$\eta_{aIN} = 0,943$

W tabeli nr 3 podano koszty inwestycyjne maszyn i urządzeń (bez robocizny) dla różnych układów napędowych. Do porównania cen przyjęto silnik synchroniczny i asynchroniczny tej samej mocy i o tej samej liczbie par biegunów ($P_N = 2000 \text{ kW}$, $n_0 = 750 \text{ obr/min}$).

tabela 3

Lp.	Wyszczególnienie	Koszt układu
1	Koszt inwestycyjny silnika asynchronicznego i wzbudnicy samowzбудnej - przesuwownika fazowego Leblanc-Scherbiusa wraz z silnikiem pomocniczym i przełącznikiem	485.000 zł

c.d. tabeli nr 3

Lp.	Wyszczególnienie	Koszt układu
2	Koszt inwestycyjny maszyn i urządzeń układu przy mechanicznym połączeniu bezstojanowej przetwornicy częstotliwości z silnikiem asynchronicznym	602.800,-zł
3	Koszt inwestycyjny maszyn i urządzeń układu przy elektrycznym połączeniu bezstojanowej przetwornicy częstotliwości z silnikiem asynchronicznym	563.800,-zł
4	Koszt inwestycyjny silnika synchronicznego, przetwornicy dwumaszynowej - wzbudnicy, autotransformatora rozruchowego i trzech wyłączników W_N	738.700,-zł

Gdyby silnik asynchroniczny pierścieniowy trójfazowy o danych $P_N = 2000 \text{ kW}$, $n_N = 740 \text{ obr/min}$, $\cos \varphi_N = 0,88$, $\eta_N = 95\%$ pracował ze zwartym uzwojeniem wirnika i był kompensowany na zaciskach stojana przy pomocy baterii kondensatorów na $\cos \varphi = 1$ moc tej baterii wynosiłaby $Q = 1132 \text{ kVAR}$. Przyjmując koszt inwestycyjny instalacji kondensatorowej w wysokości 250,-zł za 1 kVAR (w tym zawarty jest również koszt pomieszczenia), koszt całej instalacji wyniesie 283.000,-zł. Całkowity koszt inwestycyjny układu napędowego (silnik asynchroniczny, rozrusznik, bateria kondensatorowa) wyniesie 735.800,-zł.

Zalety silnika asynchronicznego pracującego ze wzbudnicą, w stosunku do silnika synchronicznego:

- a) mniejszy koszt inwestycyjny,
- b) większa przeciążalność momentem,
- c) w razie uszkodzenia wzbudnicy silnik może pracować ze zwartym uzwojeniem wirnika,
- d) mniejszy prąd rozruchu (rozruch przy pomocy rozrusznika),
- e) prostszy rozruch,
- f) łatwiejsza obsługa.

Zalety silnika synchronicznego w stosunku do silnika asynchronicznego pracującego ze wzбудnicą:

- a) przy biegu jałowym silnik synchroniczny wydaje do sieci większą moc bierną indukcyjną,
- b) większa sprawność układu,
- c) zależność momentu silnika od pierwszej potęgi napięcia sieci zasilającej.

LITERATURA

1. L. D r e y f u s - Kommutatorkaskaden und Phasenschieber. Springer, 1931.
2. M. K o s t i e n k o - Elektrischeskie masziny. Specjalnaja czast', Gosenergoizdat, 1949.
3. J. O b r a p a l s k i - Gospodarka energetyczna PWT, 1955.
4. Z. K u c z e w s k i, Z. N o w o m i e j s k i - Silnik asynchroniczny skompensowany za pomocą przesuwника fazowego Leblanc-Scherbius. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka Nr 2, PWN, 1956 r.
5. Z. K u c z e w s k i - Przesuwnik fazowy krajowej produkcji. Energetyka Przemysłowa Nr 12, 1958 r.
6. Z. K u c z e w s k i - Analiza układu silnika asynchronicznego z przetwornicą częstotliwości. Praca doktorska 1961 r.

МАШИННАЯ КОМПЕНСАЦИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С о д е р ж а н и е

Автором рассматриваются простые методы компенсации больших асинхронных двигателей посредством коммутаторных машин переменного тока. Дано сравнение энергетических и механических показателей при разных методах компенсации.

LA COMPENSATION DE LA PUISSANCE RÉACTIVE DES MOTEURS ASYNCHRONES AVEC DES MACHINES AUXILIAIRES

R e s u m é

Dans ce rapport, l'auteur donne l'analyse des méthodes simples de compensation des moteurs asynchrones de grande puissance à l'aide des machines à commutateur pour les courants alternatifs. Il fait une comparaison des indices énergétiques et mécaniques des moteurs d'entraînement pour les diverses méthodes de compensation.