Maszyny synchroniczne

1. Wymagania ogólne

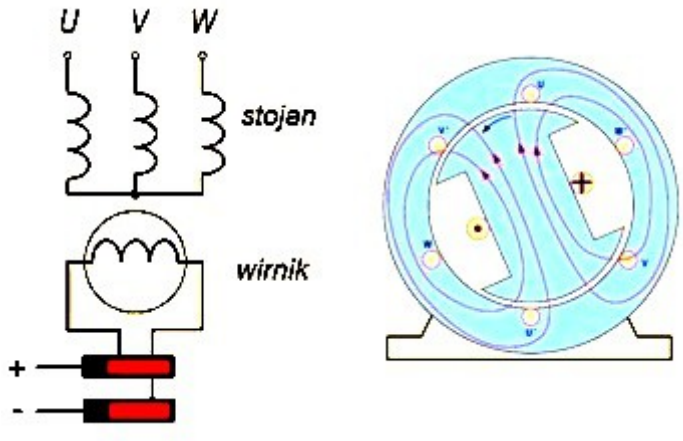
Maszyna synchroniczna jest maszyną prądu przemiennego, której wirnik w stanie ustalonym obraca się z taką samą prędkością, z jaką wiruje pole magnetyczne.

Maszyny synchroniczne mogą pracować jako: prądnice (generatory wytwarzające energię elektryczną), silniki synchroniczne (coraz częściej stosowane ze względu na korzystne właściwości ruchowe), a także jako kompensatory synchroniczne.

2. Budowa i zasada działania maszyn synchronicznych

Rozwiązania konstrukcyjne maszyn synchronicznych zależą od ich prędkości obrotowej oraz mocy i związanego z nią systemu chłodzenia.

W maszynach synchronicznych uzwojenie twornika, jednofazowe lub znacznie częściej trójfazowe, jest zwykle umieszczone w stojanie, a uzwojenie wzbudzające (magneśnica) - w wirniku (Rys. 1).



Rys.1. Budowa i zasada działania maszyny synchronicznej

W maszynach małej mocy uzwojenie twornika maszyn trójfazowych znajduje się się w wirniku, a uzwojenie wzbudzające - w stojanie. Obwód magnetyczny stojana (rdzeń) tworzą pakiety złożone z blach o grubości od 0,35 do 0,5 mm. Rdzeń jest osadzony w korpusie wykonanym jako odlew lub konstrukcja spawana. W żłobkach pakietu twornika jest umieszczone uzwojenie prądu przemiennego - jednofazowe lub trójfazowe. Na wirniku, wykonanym z materiału litego, w żłobkach umieszczone jest uzwojenie wzbudzające, zasilane prądem stałym. Szczelina powietrzna wynosi od 5 do 50 mm.

Każda maszyna synchroniczna ma wykonany odpowiedni układ chłodzenia do odprowadzania ciepła powstałego w wyniku strat w stali i w miedzi.

Maszyny synchroniczne budowane są w dwóch zasadniczych odmianach:
- z biegunami utajonymi (z wirnikiem cylindrycznym),
- z biegunami jawnymi (z wirnikiem jawnobiegunowym).

Maszyny synchroniczne z biegunami utajonymi to maszyny pracujące z dużymi prędkościami obrotowymi, najczęściej jako generatory napędzane turbinami parowymi lub gazowymi, stąd ich nazwa **turbogeneratory**. Synchroniczna prędkość obrotowa tych maszyn wynosi 3000 obr/min (rzadziej 1500 obr/min), przy częstotliwości 50 Hz. Turbogeneratory pracują z wałem w położeniu poziomym. Maszyny tego typu są podstawowymi maszynami prądotwórczymi dla systemu elektroenergetycznego, instalowane w przemysłowych elektrowniach konwencjonalnych. Ich moce znamionowe wynoszą od kilkuset KVA do ponad 1500 MW. W turbogeneratorach najczęściej stosuje się chłodzenie powietrzne pośrednie w obiegu zamkniętym. W praktyce, największe możliwości zwiększenie mocy turbogeneratora można uzyskać przez zintensyfikowanie chłodzenia, które można uzyskać przez zastosowanie chłodzenia bezpośredniego oraz zastosowanie czynnika chłodzącego o lepszych właściwościach, czyli wodoru i wody. W turbogeneratorach o mocy 200 MW stosuje się bezpośrednie chłodzenie wodorowe uzwojeń wirnika i pośrednie chłodzenie wodorowe uzwojeń stojana. Przy większych mocach powyżej 200 MW uzwojenie stojana musi być chłodzone bezpośrednio. Do tego celu stosuje się wodę odpowiednio uzdatnioną. Graniczną mocą turbogeneratorów z bezpośrednim chłodzeniem wodnym uzwojeń stojana i uzwojenia wirnika jest 2000 MW.

Maszyny synchroniczne z biegunami jawnymi to maszyny z dwoma lub więcej parami biegunów, napędzane turbinami wodnymi o malej prędkości obrotowej (stąd nazwa **hydrogeneratory)**, a ich znamionowa oraz maksymalna dopuszczalna prędkość obrotowa, dobierana odpowiednio do rodzaju turbiny, wynosi od 62,5 do 500 obr/min.

Turbiny wodne mają małe prędkości obrotowe, stąd hydrogeneratory muszą być wykonane z dużą liczbą par biegunów. Pracują najczęściej z wirnikami w położeniu pionowym.

W maszynach synchronicznych występuje stała zależność między prędkością obrotową maszyny synchronicznej n (obr/min), liczbą par biegunów magnetycznych p i częstotliwością f (w Hz) wg zależności:

$$f = \frac{pn}{60}$$

Prędkość maszyny synchronicznej jest stała i niezależna od obciążenia oraz napięcia zasilającego. Zmianę kierunku wirowania silnika uzyskuje się przez zamianę przyłączonych do tabliczki zaciskowej dwóch przewodów po stronie zasilania. Jeżeli wzbudnicą jest maszyna prądu stałego samowzbudna, osadzona na wale silnika lub z nim sprzęgnięta, to przy zmianie kierunku wirowania należy także odpowiednio zmienić połączenia wzbudnicy.

Strumień magnetyczny w maszynie synchronicznej może być wytwarzany przez magnes trwały lub - znacznie częściej - przez elektromagnes. Jeżeli strumień jest wytwarzany przez elektromagnes, to uzwojenie magnesów jest zasilane prądem stałym, zwanym prądem wzbudzenia.

Prąd wzbudzenia jest zwykle pobierany z prostownika, baterii akumulatorów lub prądnicy prądu stałego (zwanej wzbudnicą). Wzbudnica może być umieszczona na wspólnym wale z maszyną synchroniczną. W małych maszynach uzwojenie wzbudzające jest umieszczone w stojanie.

Jeżeli uzwojenie wzbudzające wirnika jest zasilane prądem stałym, to wytwarza sie strumień Φ_f. Przy napędzaniu wirnika ze stałą prędkością n strumień magnetyczny skojarzony z daną fazą uzwojenia stojana zmienia się sinusoidalnie i indukuje w tej fazie napięcie, które

również zmienia się sinusoidalnie. Jeżeli w stojanie (tworniku) znajduje sie uzwojenie trójfazowe, to indukuje się w nim układ napięć trójfazowych. Maszyna przetwarza doprowadzoną do niej energię mechaniczną na elektryczną, czyli pracuje jako prądnica.

Jeżeli uzwojenie stojana będzie zasilane z sieci symetrycznym prądem trójfazowym o częstotliwości f_1, to powstanie pole magnetyczne wirujące z prędkością:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

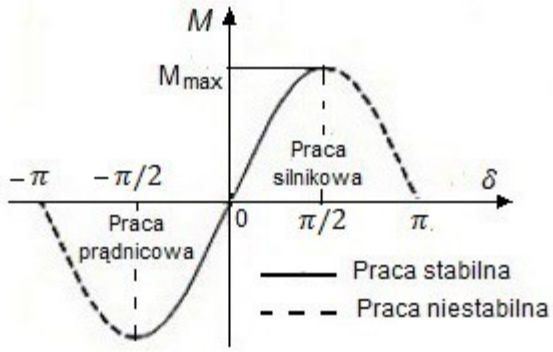
Stan wzbudzenia maszyny synchronicznej potrzebny do uzyskania (przy określonej mocy *P)* współczynnika mocy cosφ =1 nazywa się **stanem wzbudzenia normalnego,** natomiast:

- prądnicę pracującą przy obciążeniu indukcyjnym (oraz silnik przy obciążeniu pojemnościowym) nazywa się **przeciwzbudzoną**,
- prądnicę pracującą przy obciążeniu pojemnościowym (oraz silnik przy obciążeniu indukcyjnym) nazywa się **niedowzbudzoną.**

3. Rodzaje pracy maszyn synchronicznych

Na podstawie przebiegu $M = f(\delta)$ (Rys.2), można określić następująco rodzaje pracy maszyny indukcyjnej,:

- od $-\pi$ do $-\pi/2$ maszyna pracuje jako prądnica przewzbudzona, tj. oddaje do sieci moc czynną oraz moc bierną indukcyjną;
- od $-\pi/2$ do 0 maszyna pracuje jako prądnica niedowzbudzona, tj. oddaje do sieci moc czynną i pobiera z niej moc bierną indukcyjną;
- od 0 do $\pi/2$ maszyna pracuje jako silnik niedowzbudzony, tj. pobiera z sieci moc czynną oraz moc bierną indukcyjną;
- od $\pi/2$ do π) maszyna pracuje jako silnik przewzbudzony, tj. pobiera z sieci moc czynną i oddaje do sieci moc bierną indukcyjną.



Rys. 2. Rodzaje pracy maszyny synchronicznej

Praca kompensatorowa maszyny indukcyjnej występuje wówczas, gdy prąd jest przesunięty w fazie względem napięcia o kąt 90°; przy opóźnieniu prądu kompensator oddaje do sieci moc bierną indukcyjną; przy wyprzedzaniu - pobiera moc bierną indukcyjną.

Kompensatory synchroniczne (czyli generatory mocy biernej) pracują jak silniki synchroniczne nieobciążone momentem na wale, pobierając z sieci nieznaczną moc czynną na

pokrycie strat w maszynie oraz właściwą dla jego pracy moc bierną pojemnościową. Oddaje jednocześnie do sieci moc bierną indukcyjną. Poprawie ulega bilans mocy biernej w sieci.

Wzbudzenie kompensatorów jest uzależnione od stanu obciążenia linii. Kompensatory są przystosowane do rozruchu asynchronicznego, a bardzo duże jednostki w tym celu są wyposażone w silniki rozruchowe. Kompensatory stosuje się także do poprawienia współczynnika mocy zakładu przemysłowego.

Kompensatory synchroniczne są stosowane w liniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia do regulacji napięcia przez zmianę rozpływu prądów biernych. Obecnie są zastępowane przez baterie kondensatorów, których poszczególne sekcje są uruchamiane automatycznie.

4. Praca i właściwości ruchowe maszyn synchronicznych

Podczas analizy pracy maszyn synchronicznych przyjmuje się często, dla uproszczenia, że obwód magnetyczny jest nienasycony, czyli zakłada się liniowość charakterystyki magnesowania, co wyraża się liniową zależnością między przepływem Θ a strumieniem magnetycznym Φ. Jednak przy obliczeniach dla dużych maszyn należy korzystać z analizy pola magnetycznego w stanie nasyconym, a więc powyżej zagięcia charakterystyki magnesowania (Rys. 3 i 4).

Rezystancja magnetyczna obwodu magnetycznego maszyny (reluktancja), w odniesieniu do strumienia wzbudzenia nie zależy od stanu nasycenia obwodu magnetycznego, natomiast w odniesieniu do strumienia wytworzonego w stojanie (tworniku) , zależy zarówno od stanu nasycenia, jak i wzajemnego położenia osi przepływu stojana względem osi magnetycznych wirnika. Metody analiz maszyn synchronicznych zależą w dużej mierze od tego, czy jest to maszyna: cylindryczna czy jawnobiegunowa (nienasycona czy nasycona).

4.1 Bieg jałowy prądnicy synchronicznej

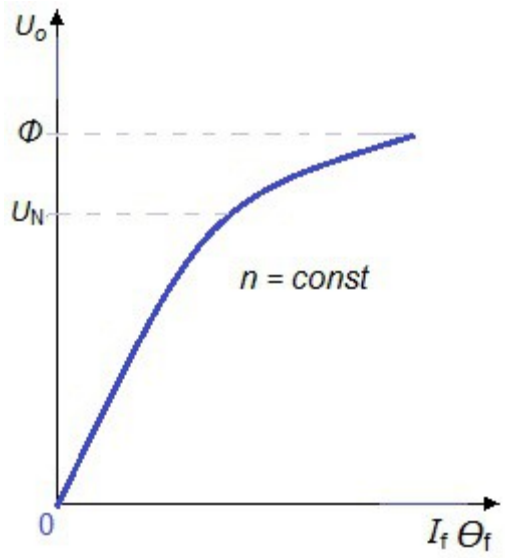
Biegiem jałowym prądnicy synchronicznej jest taki stan, w którym uzwojenie stojana jest rozwarte, a uzwojenie wirnika jest zasilane prądem wzbudzenia I_f. Pole magnetyczne występujące w maszynie przy biegu jałowym jest wytworzone przez prąd wzbudzenia I_f. Linie tego pola przenikają przez szczelinę powietrzną do stojana i sprzęgają się z uzwojeniem stojana. Tę część strumienia nazywa się **strumieniem głównym Φ_f.**. Pozostała część tego strumienia sprzęga się z uzwojeniem wirnika, tworząc tzw. strumień rozproszony.

Pod wpływem wirującego strumienia głównego Φ_f w uzwojeniach fazowych stojana indukują się siły elektromotoryczne o wartości skutecznej:

$$E_f = 4{,}44 k_u N \Phi_f$$

Przy biegu jałowym napięcie U_o na zaciskach prądnicy jest równe napięciu indukowanemu w uzwojeniu twornika E_f, czyli $U_o = E_f$.

Przy stałej prędkości obrotowej wartość napięcia U_o zależy od prądu wzbudzenia; ponieważ wartość strumienia Φ_f zależy od wartości prądu I_f. Zależność U_o przy n =const nazywa się charakterystyką biegu jałowego prądnicy (rys. 3).



Rys. 3. Charakterystyka biegu jałowego

Przy stałej prędkości obrotowej indukowane napięcie jest proporcjonalne do strumienia głównego ($E_f = c\Phi_f$), więc charakterystyka biegu jałowego ma taki sam przebieg, jak charakterystyka magnesowania $\Phi_f = f(I_f)$.

4.2. Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej

Prąd w uzwojeniu wzbudzającym wytwarza strumień Φ_f, który indukuje w uzwojeniu twornika napięcie E_f, natomiast prąd płynący w uzwojeniu twornika wytwarza strumień. którego część linii przechodzi ze stojana do twornika, tworząc tzw. strumień oddziaływania twornika Φ_a. Pozostała część strumienia sprzęga się tylko z uzwojeniem twornika i nazywa się strumieniem rozproszenia twornika Φ_r.

Wartości strumieni Φ_f i Φ_a wiążą się z wartościami reaktancji oddziaływania twornika X_{ad} i reaktancji rozproszenia twornika X_r. Jeżeli dla uproszczenia pominięta zostanie rezystancja twornika, to można przyjąć, że siła elektromotoryczna indukowana w tworniku równa się:

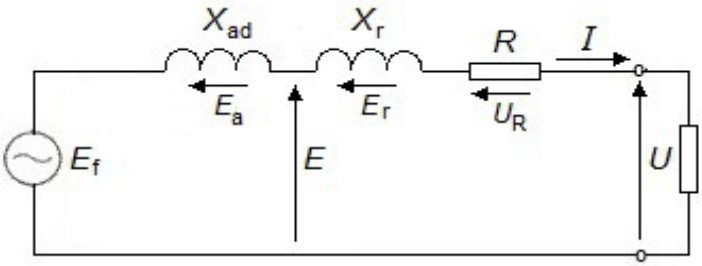
$$E = E_f \pm I \cdot X_{ad}$$

natomiast równanie napięć dla twornika jest następujące:

$$U = E_f - \Delta U_{ad} - \Delta U_f$$

przy czym: ΔU_{ad} - spadek napięcia na reaktancji oddziaływania twornika.

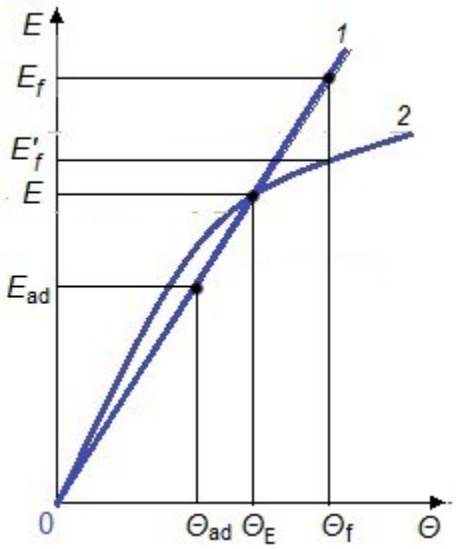
Po uwzględnieniu tej zależności można sporządzić uproszczony jednofazowy schemat zastępczy maszyny synchronicznej w stanie nienasyconym (Rys. 4):



Rys. 4. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej w stanie nienasyconym

Maszyna synchroniczna, której obwód magnetyczny pracuje w obszarze wykraczającym poza stan prostoliniowej charakterystyki magnesowania, pracuje w stanie nasyconym (Rys. 5 - charakterystyka 2).

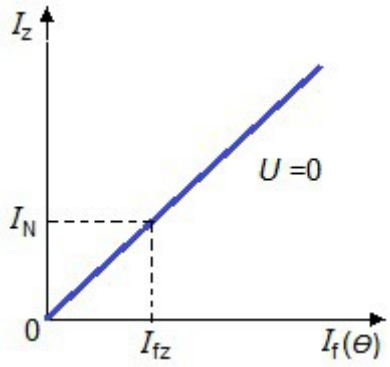
Aby dla maszyn nasyconych wyznaczyć wypadkowy strumień magnetyczny Φ i indukowane napięcie E, należy zsumować przepływ wirnika (wzbudzenia Θ_f) z przepływem stojana (twornika Θ_{ad}). Otrzymany przepływ wypadkowy Θ_E, określający strumień wypadkowy w maszynie.



Rys. 5. Charakterystyki biegu jałowego:
1 - maszyny nienasyconej, 2 - maszyny nasyconej

4.3. Praca maszyny synchronicznej w stanie zwarcia

Maszyna synchroniczna pracuje w stanie zwarcia wtedy, gdy zaciski maszyny napędzanej są zwarte, a obwód wzbudzenia jest zasilany. Zależność prądu twornika I_z od prądu wzbudzenia I_f, przy zwarciu uzwojenia twornika, nazywa się charakterystyką zwarcia: (Rys. 6)



Rys. 6. Charakterystyka zwarcia

Stosunek znamionowego prądu wzbudzenia w stanie jałowym I_{f0} do znamionowego prądu wzbudzenia przy zwarciu I_{fz} można zapisać jako stosunek zwarcia maszyny synchronicznej:

$$k_z = \frac{I_{f0}}{I_{fz}}$$

Jeżeli prąd zwarcia I_{z0} jest prądem zwarcia występującym przy prądzie wzbudzenia I_{f0}, to stosunek zwarcia k_z można wyrazić jako zależność:

$$k_z = \frac{I_{f0}}{I_{fz}} = \frac{I_{z0}}{I_N}$$

Stosunek zwarcia k_z charakteryzuje podstawowe właściwości maszyny synchronicznej; przyjmuje wartości od 0,5 do 1,5.

4.4. Moc i moment obrotowy maszyny synchronicznej

Moc czynna wydawana przez prądnicę (lub pobierana przez silnik), przy założeniu, że rezystancja uzwojenia twornika równa się zero, jest określona zależnością:

$$P = m\,U\,I\cos\varphi$$

gdzie:
- m - liczba faz;
- U - napięcie fazowe;
- I - prąd fazowy.

Moment elektromagnetyczny, w Nm (niutonometrach), jest określony zależnością:

$$M = 9{,}55\frac{P}{n_1}$$

gdzie:
- P - moc elektryczna (w W),
- n_1 - prędkość obrotowa (w obr/min).

Moment obrotowy wymagany do napędzania maszyny w przybliżeniu wynosi:

$$M \approx 9{,}55 \frac{m}{n_1} \frac{UE_f}{X_d} \sin\vartheta$$

przy czym wartość momentu maksymalnego:

$$M_{max} = 9{,}55 \frac{m}{n_1} \frac{UE_f}{X_d}$$

gdzie:
- E_f - siła elektromotoryczna w uzwojeniach fazowych;
- U - napięcie fazowe sieci;
- X_d- reaktancja synchroniczna podłużna;
- ϑ - kąt obciążenia;
- m- liczba faz;
- n_1 - prędkość obrotowa.

Często prądnice synchroniczne pracują w innych warunkach niż znamionowe. Należą do nich: napięcie, współczynnik mocy i temperatura czynnika chłodzącego.

Prądnice są przystosowane do wytwarzania mocy znamionowej przy napięciu różniącym się od znamionowego nie więcej niż ok. 5%, z zachowaniem znamionowego współczynnika mocy i znamionowej mocy.

W turbogeneratorach dużej mocy zakres dopuszczalnych zmian napięcia, przy znamionowym obciążeniu, może być większy i jest podawany dokumentacji techniczno-ruchowej. Praca przy współczynniku mocy różnym od znamionowego wymaga wyznaczenia dopuszczalnego obciążenia.

Dopuszczalne obciążenie prądnicy w przypadku czynnika chłodzącego o temperaturze różnej od znamionowej wymaga doświadczalnego badania określonego typu maszyny. Wskazówki ogólne dla turbogeneratorów chłodzonych powietrzem i chłodzonych wodorem, w zależności od znamionowej temperatury otoczenia (dla powietrza) i od dopuszczalnego obciążenia turbogeneratorów chłodzonych wodorem, są określane przez wytwórcę w instrukcjach eksploatacji.

Przy obciążeniu prądnicy występują w maszynie dwa przepływy:
- przepływ wzbudzenia Θ_f , wytworzony przez prąd uzwojenia wzbudzającego, oraz
- przepływ stojana (czyli przepływem twornika Θ_{ad}), wytworzony przez prąd przemienny w uzwojeniu twornika.

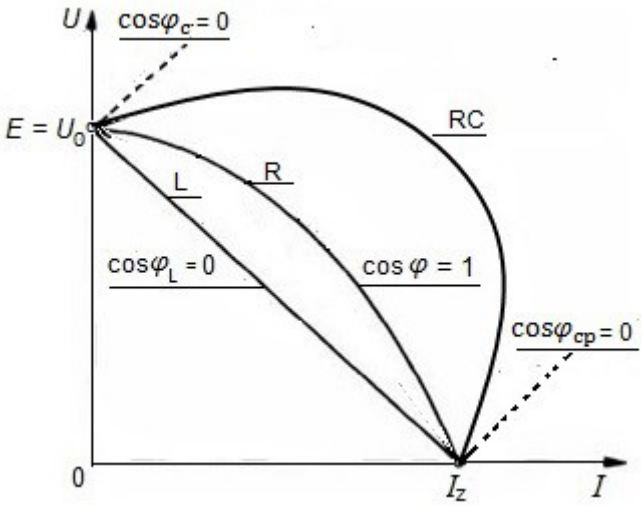
Oba przepływy w warunkach pracy ustalonej są nieruchome względem siebie i wirują z tą samą prędkością znamionową względem stojana.

W przypadku gdy prądnica synchroniczna jest obciążona tylko odbiornikiem pobierającym prąd, to taką pracę nazywa się pracą indywidualną lub samotną, natomiast sieć, do której jest prądnica przyłączona – siecią wydzieloną. W tej sytuacji kąt przesunięcia fazowego między napięciem na zaciskach maszyny i prądem obciążenia zależy od rodzaju odbiornika. Przy określonym prądzie obciążenia o częstotliwości f (Hz) decyduje prędkość obrotowa, z jaką prądnica jest napędzana, a napięcie prądnicy zależy od prędkości obrotowej i prądu wzbudzenia.

4.5. Charakterystyki zewnętrzne prądnicy synchronicznej

Charakterystyka zewnętrzna prądnicy synchronicznej U_f, przy niezmiennych $I_f = 0$ i n - 0 oraz $\cos\varphi = 0_{ind}$, określa zmiany napięcia na zaciskach uzwojenia twornika, w zależności od zmian wartości prądu obciążenia.

Rysunek 7. przedstawia charakterystyki zewnętrzne prądnicy nienasyconej, dla różnych współczynników mocy (linie kreskowane określają niestabilne części charakterystyk dla obciążenia pojemnościowego i czynnopojemnościowego.



Rys. 7. Charakterystyki zewnętrzne prądnicy cylindrycznej nienasyconej

Z charakterystyki zewnętrznej wynika, że wzrostowi obciążenia o charakterze indukcyjnym odpowiada obniżenie się napięcia na zaciskach prądnicy, natomiast wzrostowi obciążenia o charakterze pojemnościowym odpowiada w zakresie od biegu jałowego do obciążenia znamionowego wzrost napięcia na zaciskach prądnicy.

4.6. Rozruch silników synchronicznych

Rozruch silników synchronicznych zalicza się do rozruchów trudnych, dla których często wymaga się instalowania dodatkowych urządzeń i aparatury.

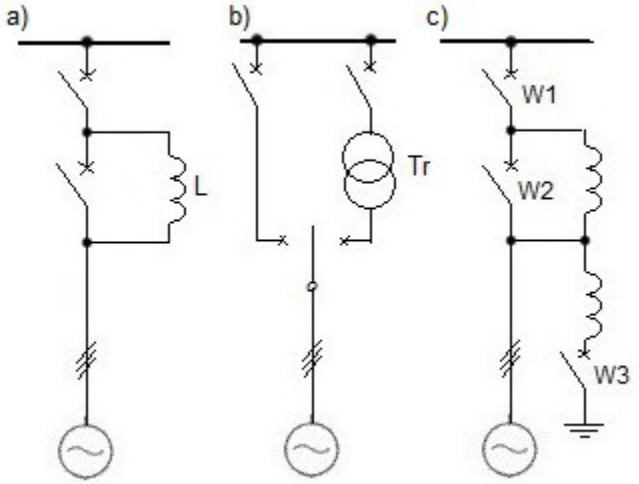
Rozruch silnika synchronicznego przeprowadza się:

- wykorzystując moment asynchroniczny silnika synchronicznego, wytworzony przez klatkę,
  rozruchową, po włączeniu silnika do sieci (rozruch asynchroniczny),
- stosując pomocniczą maszynę napędową,
- wykorzystując moment synchroniczny (tzw. rozruch częstotliwościowy).

Silniki synchroniczne, wyposażone w uzwojenie rozruchowe klatkowe, wykonane z brązu lub mosiądzu umieszczone w nabiegunnikach, umożliwiają rozruch asynchroniczny przy bezpośrednim włączeniu do sieci zasilającej. Silnik z uzwojeniem rozruchowym ma więc w wirniku dwa uzwojenia: wzbudzające i klatki rozruchowej. Ten sposób rozruchu odbywa się tak, jak w silniku indukcyjnym klatkowym. Po osiągnięciu przez silnik synchroniczny prędkości obrotowej, przy której poślizg $s \leq 0{,}05$ (5%), włącza się układ wzbudzenia, co powoduje wprowadzenie wirnika w bieg synchroniczny.

Moment rozwijany przez silnik synchroniczny podczas rozruchu asynchronicznego przy prędkości obrotowej równej 95% prędkości znamionowej, nazywa się momentem podsynchronicznym. Określa on maksymalny moment obciążenia, przy którym silnik może być - po wzbudzeniu - wprowadzony w bieg synchroniczny.

Ograniczenie prądu rozruchowego pobieranego z sieci, przy obniżonym napięciu, można uzyskać stosując np. dławik, transformator rozruchowy lub autotransformator z rozwiernym punktem gwiazdowym (rozruch dwustopniowy) (Rys.10).



Rys. 10. Układy połączeń silnika synchronicznego podczas rozruchu
Oznaczenia: a) - włączenie przez dławik, b) - włączenie przez transformator rozruchowy, c) - włączenie przez autotransformator

1) Rozruch silnika synchronicznego przy użyciu autotransformatora przebiega następująco:

a) podczas pierwszego stopnia rozruchu - układ transformatora z rozwiernym punktem gwiazdowym działa jak zwykły autotransformator (wyłączniki W2 otwarty, W3 zamknięty);

b) w drugim stopniu rozruchu - punkt gwiazdowy jest rozwarty, uzwojenie szeregowe autotransformatora pracuje jak dławik; wyłącznik W3 otwarty - po zamknięciu wyłącznika W2 - silnik jest bezpośrednio włączony do sieci.

Zastosowanie urządzeń obniżających napięcie na zaciskach silnika podczas rozruchu powoduje, że prąd rozruchowy I_1 pobierany z sieci zmniejsza się proporcjonalnie do napięcia przy użyciu dławików, natomiast z kwadratem napięcia w układach z autotransformatorem. Jednocześnie moment rozruchowy początkowy M_1 zmniejsza się z kwadratem napięcia.

Autotransformatory stosowane do rozruchu silników indukcyjnych posiadają nastawialną przekładnie napięciową n_u.

2) Rozruch za pomocą dodatkowej maszyny

Rozruch silnika synchronicznego z dodatkową maszyną napędzającą odbywa się podobnie jak prądnicy, a więc metodą synchronizacji dokładnej lub samosynchronizacji. Ten sposób rozruchu, ze względu na konieczność stosowania dodatkowych maszyn, jest kłopotliwy i dlatego jest stosowany bardzo rzadko.

3) Rozruch częstotliwościowy

Rozruch częstotliwościowy polega na zasilaniu uzwojenia twornika uruchamianego silnika z oddzielnej prądnicy synchronicznej, której prędkość obrotową, a więc i częstotliwość, zwiększa się od zera do prędkości synchronicznej. Jeżeli uzwojenie silnika jest zasilane przy włączonym wzbudzeniu silnika, to przy powolnym uruchamianiu prądnicy i

stopniowym zwiększaniu jej prędkości, wirnik silnika będzie nadążać za wirnikiem prądnicy.

Po osiągnięciu znamionowej prędkości obrotowej, odpowiadającej częstotliwości sieci, można włączyć cały zespół do sieci, odłączając jednocześnie prądnicę rozruchową.

Do rozruchu częstotliwościowego można stosować, zamiast prądnic synchronicznych, przetwornik częstotliwości. Z przedstawionego przeglądu wynika, że rozruch silnika synchronicznego jest dość kłopotliwy i wymaga instalowania dodatkowych urządzeń i aparatury. Jest to podstawową wadą silników synchronicznych.