

BADANIE PRĄDNICY SYNCHRONICZNEJ

Cel ćwiczenia: poznanie budowy, zasady działania i charakterystyk oraz metod synchronizacji i współpracy prądnicy synchronicznej z siecią.

1.1. Podstawy teoretyczne

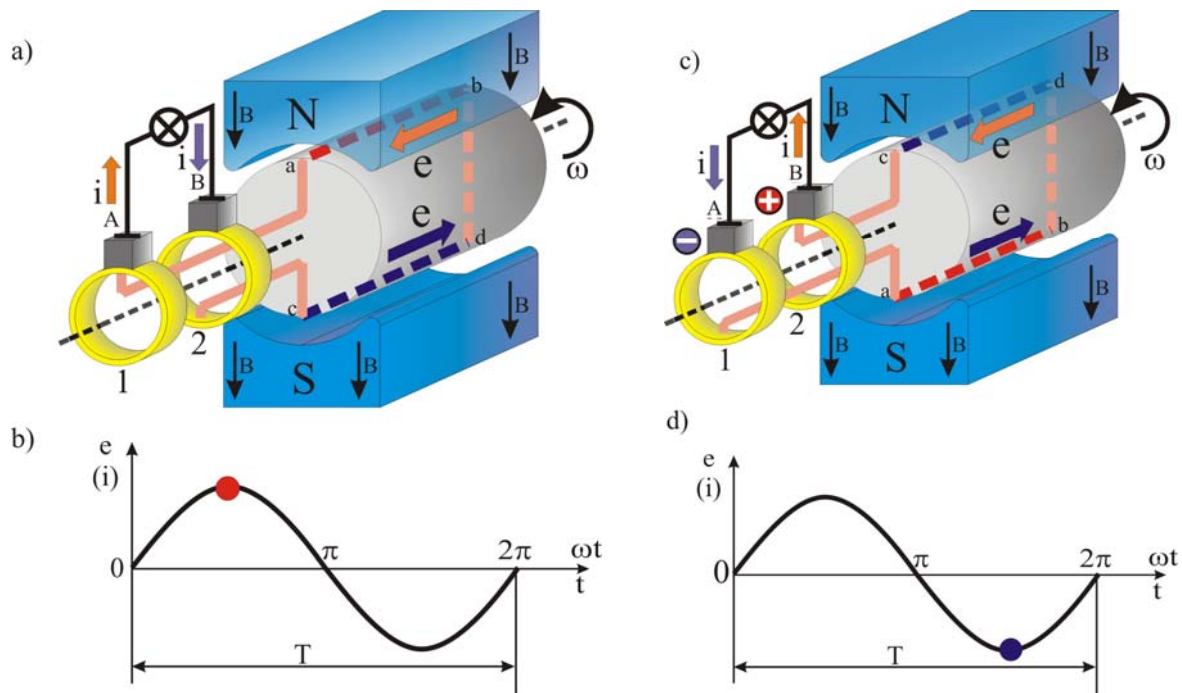
1.1.1. Budowa i zasada działania prądnicy synchronicznej

Maszyną synchroniczną nazywamy maszynę prądu przemiennego, w której między częstotliwością napięcia w tworniku f i prędkością wirowania wirnika n zachodzi związek

$$f = \frac{n \cdot p}{60}, \quad (1.1)$$

gdzie p jest liczbą par biegunów magnetycznych. Wynika z tego, że wirnik i wypadkowe pole magnetyczne w tej maszynie wirują z tą samą prędkością, czyli synchronicznie (współbieżnie). Praca maszyny synchronicznej jest odwracalna, tzn. może pracować jako prądnica lub jako silnik. W praktyce maszyny te są najczęściej wykorzystywane jako generatory w elektrowniach do wytwarzania napięcia przemiennego. Niezależnie od typu elektrowni przetwornikiem przetwarzającym energię dowolnego rodzaju w energię elektryczną prądu przemiennego jest najczęściej prądnica synchroniczna. Generatory mniejszych mocy stosowane są również w zespołach prądotwórczych, w których silnikiem napędowym jest zwykle silnik spalinowy. Zespoły prądotwórcze są wykorzystywane jako tzw. elektrownie polowe lub rezerwowe źródła zasilania.

Istota zasady działania prądnicy synchronicznej zostanie omówiona w oparciu o model przedstawiony na rys.1.1. W stałym polu magnetycznym wytworzonym przez magnesy trwałe o biegunach magnetycznych N S znajduje się ramka przewodząca prąd, której końce połączone są z pierścieniami ślizgowymi. Ramka umieszczona jest na walcu ferromagnetycznym w celu zamknięcia drogi dla strumienia magnetycznego wytworzonego przez magnesy. Jeżeli ramka wraz z walcem (rys.1.1a) zacznie się obracać, to w jej bokach czynnych ab i cd będzie indukowało się napięcie, którego przebieg pokazano na rys.1.1b. Zwrot tego napięcia określa reguła prawej dłoni. Największa wartość napięcia indukuje się w chwili, gdy boki ramki przemieszczają się pod osiá biegunów, gdzie jest największa gęstość strumienia magnetycznego (największa indukcja magnetyczna).



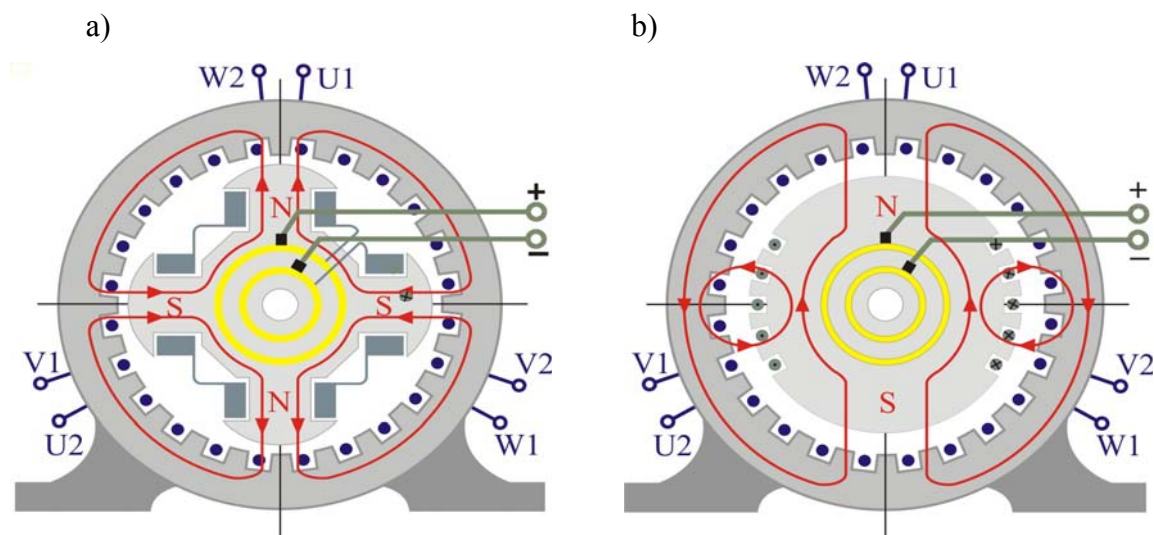
Rys.1.1. Zasada działania prądnicy synchronicznej

Obracając ramkę o 90^0 przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, od położenia jak na rys.1.1a, znajdzie się ona w przestrzeni międzybiegunowej i jej boki czynne będą sprzężone praktycznie z zerowym strumieniem magnetycznym. Napięcie indukowane w ramce w tym przypadku będzie bliskie zeru (rys.1.1b). Przy dalszym obrocie walca boki ramki zamienią się miejscami i przechodzą pod przeciwne bieguny (rys.1.1c). W związku z tym zmieni się zwrot indukowanego napięcia w bokach czynnych ramki i zwrot prądu pobieranego przez odbiornik (rys.1.1d). Z porównania rys.1.1b i rys.1.1d wynika, że obrotowi wirnika o 180^0 towarzyszy zmiana zwrotu indukowanego napięcia w ramce. Przy jednej parze biegunów magnetycznych (jak na rys.1.1) jednemu obrotowi wirnika odpowiada jeden okres indukowanego napięcia. Chwilowa wartość napięcia indukowanego e w wirującej ze stałą prędkością ramce jest proporcjonalna do indukcji magnetycznej B i prędkości wirowania ramki n , a częstotliwość f tego napięcia zależy od prędkości wirowania ramki n . Zapewniając sinusoidalny rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie między walcem ferromagnetycznym i biegunami oraz stałą prędkość wirowania ramki na nieruchomych szczotkach pojawi się napięcie sinusoidalnie zmienne o stałej amplitudzie. Wtedy przez odbiornik przyłączony do szczotek popłynie prąd przemienny.

Budowa rzeczywistej prądnicy synchronicznej znacznie odbiega od modelu, którym posłużono się przy omawianiu jej zasady działania. W typowej prądnicie wirnik zwany magneśnicą wytwarza stałe pole magnetyczne. Pole to wzbudza przepływ uzwojenia

zasilanego prądem stałym. Prąd jest doprowadzony do uzwojeń wirującej magneśnicy przez szczotki i pierścienie ślizgowe. Uzwojenia twornika zaś znajdują się wtedy w żłobkach stojana. W generatorach trójfazowych, najczęściej stosowanych w praktyce, w stojanie umieszczone są trzy pasma uzwojeń przesuniętych względem siebie w przestrzeni o 120° elektrycznych. Takie rozmieszczenie uzwojeń po obwodzie stojana zapewnia przesunięcia fazowe o 120° między indukowanymi napięciami w poszczególnych fazach. Szkic budowy prądnicy synchronicznej z biegunami wydatnymi na wirniku przedstawia rys.1.2a a z biegunami utajonymi z tzw. wirnikiem cylindrycznym rys.1.2b.

Obwody magnetyczne stojana i wirnika o określonym kształcie wykonuje się z izolowanych cienkich blach ze stali elektrotechnicznej. Taki obwód minimalizuje straty mocy spowodowane prądami wirowymi i powoduje niewielkie straty napięć magnetycznych w obwodzie magnetycznym.



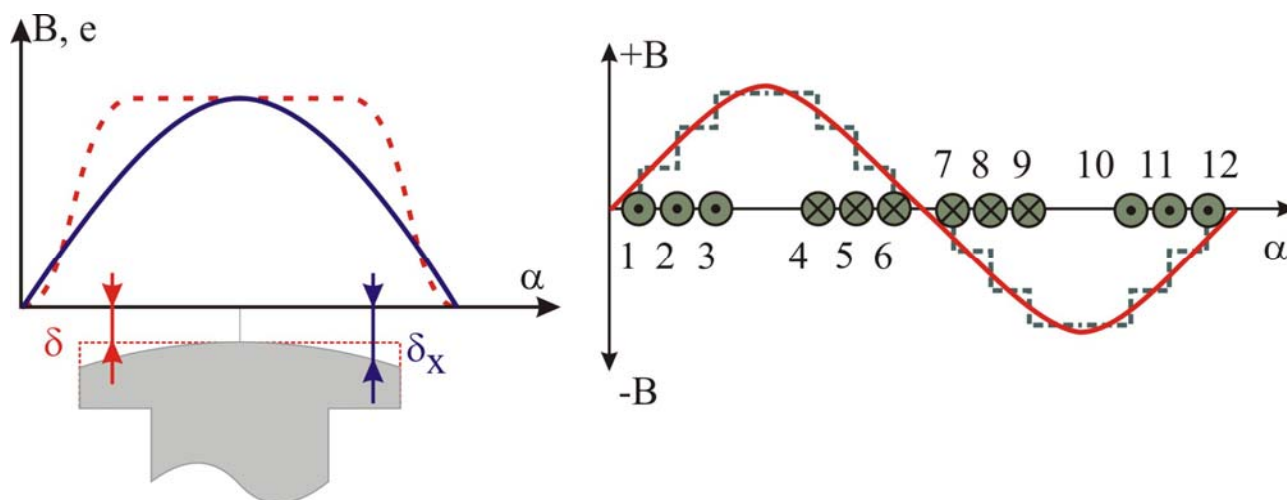
Rys.1.2. Szkic budowy prądnicy synchronicznej: a) z biegunami wydatnymi magneśnicy, b) z biegunami utajonymi

Obwody elektryczne zarówno twornika jak i wzbudzenia (magneśnicy) wykonuje się drutem miedzianym pokrytym lakierem izolacyjnym. W generatorach dużej mocy uzwojenia tworników są wykonywane przewodem miedzianym o przekroju dopasowanym do kształtu żłobków twornika. Uzwojenia te są odizolowane elektrycznie od obwodu magnetycznego.

Bieguny wydatne na wirniku są zwykle stosowane w generatorach wolnoobrotowych o dużej liczbie par biegunów, w których dopuszcza się nierównomiernie rozłożoną masę po obwodzie wirnika. Liczba par biegunów i prędkość obrotowa muszą być tak dobrane, aby częstotliwość indukowanego napięcia była równa 50 Hz zgodnie z zależnością (1.1). Bieguny

utajone natomiast stosowane są w generatorach szybkoobrotowych (3000 lub 1500 obr./min.) zwykle o jednej lub dwóch parach biegunów.

Krzywa przebiegu napięcia indukowanego w jednym paśmie uzwojenia jest ściśle uzależniona od rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie prądnicy. Zapewniając sinusoidalny rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie otrzymamy sinusoidalny przebieg napięcia wyjściowego. Zapewnienie takiego rozkładu pola uzyskuje się w różny sposób w zależności od budowy maszyny.



Rys.1.3. Kształtowanie rozkładu indukcji magnetycznej w prądnicy: a) o biegunach wydających, b) o biegunach utajonych

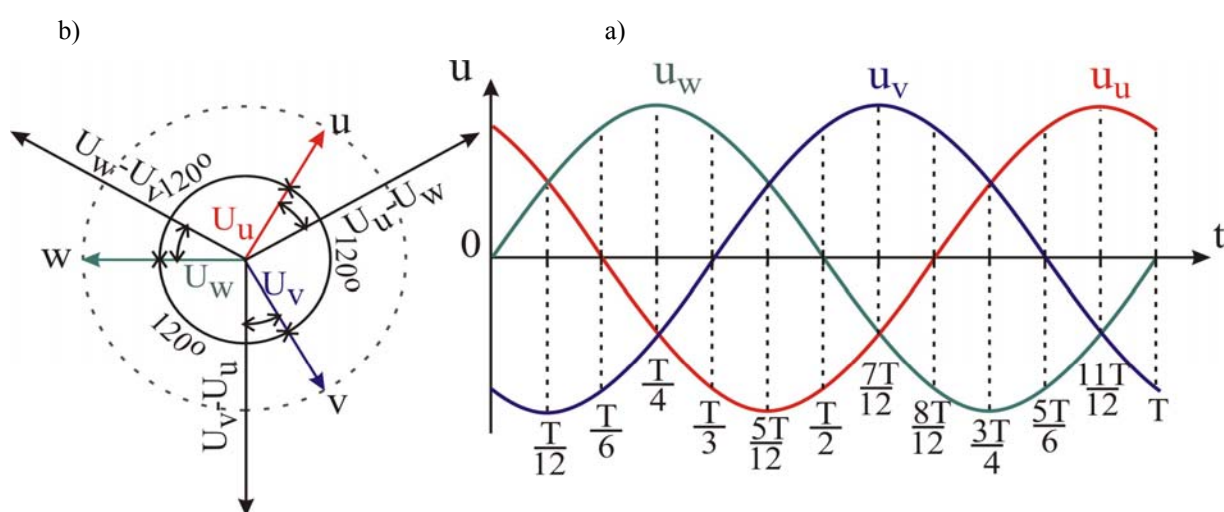
Dla prądnicy z biegunami wydającymi na wirniku stałe pole magnetyczne wytwarzane jest przez cewkę skupioną zasilaną prądem stałym. Kształtowanie rozkładu tego pola odbywa się przez odpowiedni dobór szczeliny między stojanem i wirnikiem (rys.1.3a). Przy jednakowej szczelinie rozkład indukcji magnetycznej pod biegunem (po obwodzie) miałby kształt trapezoidalny (linia przerywana na rys.1.3a). Właściwe ukształtowanie szczeliny (zwiększanie w obu kierunkach poczynając od osi bieguna) poprzez odpowiednie ukształtowanie nabiegunnika spowoduje sinusoidalny rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie (linia ciągła na rys.1.3a) i zapewni sinusoidalny przebieg indukowanego napięcia w uzwojeniach twornika generatora.

W prądnicach z biegunami utajonymi stałe pole magnetyczne jest wytwarzane przez uzwojenie magneśnicy rozłożone w żłobkach zasilane prądem stałym. Kształtowanie rozkładu pola w tym przypadku odbywa się przez dobór odpowiedniej liczby zwojów umieszczonych w każdym żłobku. Sumując przepływy wytworzone przez te uzwojenia otrzymamy schodkowy przepływ wypadkowy, którego obwiednia ma kształt zbliżony do

sinusoidy (rys.1.3b). Taki rozkład przepływu zapewnia praktycznie sinusoidalny przebieg napięcia indukowanego w uzwojeniach twornika.

1.1.2. Bieg jałowy prądnicy synchronicznej

Stałe pole magnetyczne wytworzone w wirniku przez uzwojenie zasilane prądem stałym wiruje wraz z w wirnikiem indukując napięcie przemienne w nieruchomych uzwojeniach twornika znajdujących się w zębках stojana. Przebieg napięć w funkcji czasu dla trójfazowej prądnicy przedstawiono na rys.1.4a, a odpowiadający temu przebiegowi wykres wskazowy napięć na rys.1.4b.



Rys.1.4. Przebiegi napięć trójfazowej prądnicy synchronicznej: a) wykres czasowy, b) wykres wskazowy

Jak wynika z rys. 1.4a napięcia indukowane są przesunięte w czasie o jedną trzecią okresu T , co odpowiada przesunięciom fazowym wynoszącym 120 stopni między napięciami.

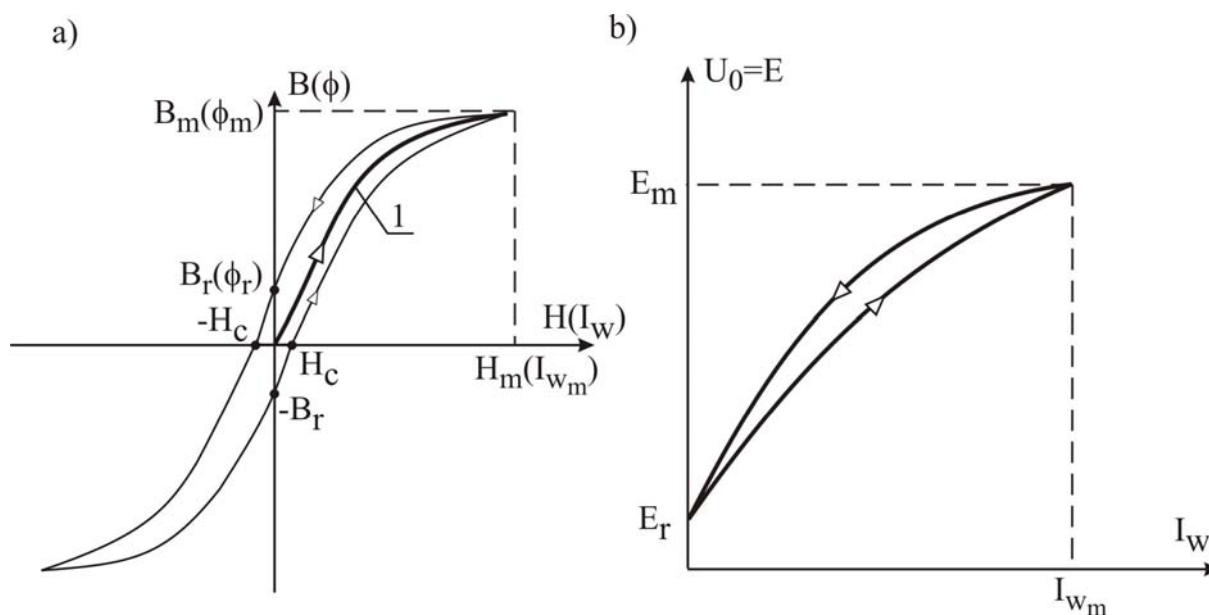
Wartość skuteczną indukowanego napięcia E w jednej fazie prądnicy synchronicznej określa wzór

$$E = 4,44\phi f z k_t \quad (1.2)$$

gdzie: ϕ jest wirującym wypadkowym strumieniem magnetycznym, f częstotliwością indukowanego napięcia określoną zależnością (1.1), z liczbą zwojów jednego pasma uzwojenia, a k_t współczynnikiem uzwojenia (zwykle nieco mniejszym od jedności).

Charakterystyką biegu jałowego prądnicy nazywamy zależność napięcia na jej zaciskach U_0 w funkcji prądu wzbudzenia I_w , przy stałej prędkości obrotowej n i braku

obciążenia ($I = 0$). Przykładowy przebieg charakterystyki $U_0 = f(I_w)$ przy powyższych założeniach przedstawia rys.1.5b.



Rys.1.5. Przykładowy przebieg charakterystyk: magnesowania i pętli histerezy $B = f(H)$ a) oraz biegu jałowego $U_0 = f(I_w)$ prądnicy synchronicznej

Napięcie U_0 na zaciskach prądnicy przy biegu jałowym jest równe napięciu E indukowanemu w uzwojeniu twornika. Przy stałej prędkości obrotowej (wtedy częstotliwość f jest również stała) napięcie indukowane w uzwojeniach twornika jest proporcjonalne do wartości strumienia wypadkowego ϕ . Strumień magnetyczny przy zmianach prądu wzbudzenia zmienia się zgodnie z krzywą $\phi = f(I_w)$, która ma kształt podobny do charakterystyki $B = f(H)$ (rys.1.5a). Jak widać z rys.1.5a przy $I_w = 0$ istnieje w obwodzie magnetycznym prądnicy pewien niewielki strumień szczątkowy ϕ_r wynikający z własności tego obwodu. Dla obwodu nienasyconego wraz ze wzrostem prądu wzbudzenia rośnie również proporcjonalnie strumień magnetyczny zgodnie z tzw. pierwotną charakterystyką magnesowania (krzywa 1 na rys.1.5a). Wraz z nasycaniem się obwodu magnetycznego, dalszy wzrost prądu wzbudzenia powoduje coraz wolniejszy przyrost strumienia i funkcja $\phi = f(I_w)$ zakrzywia się zdążając przy dużym prądzie magnesnicy do wartości ustalonej ϕ_m . Przy zmniejszaniu prądu wzbudzenia magnesnicy, ze względu na zjawisko histerezy, wartość strumienia jest nieco większa niż przy jego wzroście przy tych samych wartościach prądu (rys.1.4a). Przy przemagnesowywaniu więc obwodu magnetycznego powstaje tzw. pętla histerezy obrazująca zmiany indukcji magnetycznej B przy zmianach natężenia pola

magnetycznego H , co jest równoważne zmianom strumienia ϕ w funkcji prądu magnesującego I_w .

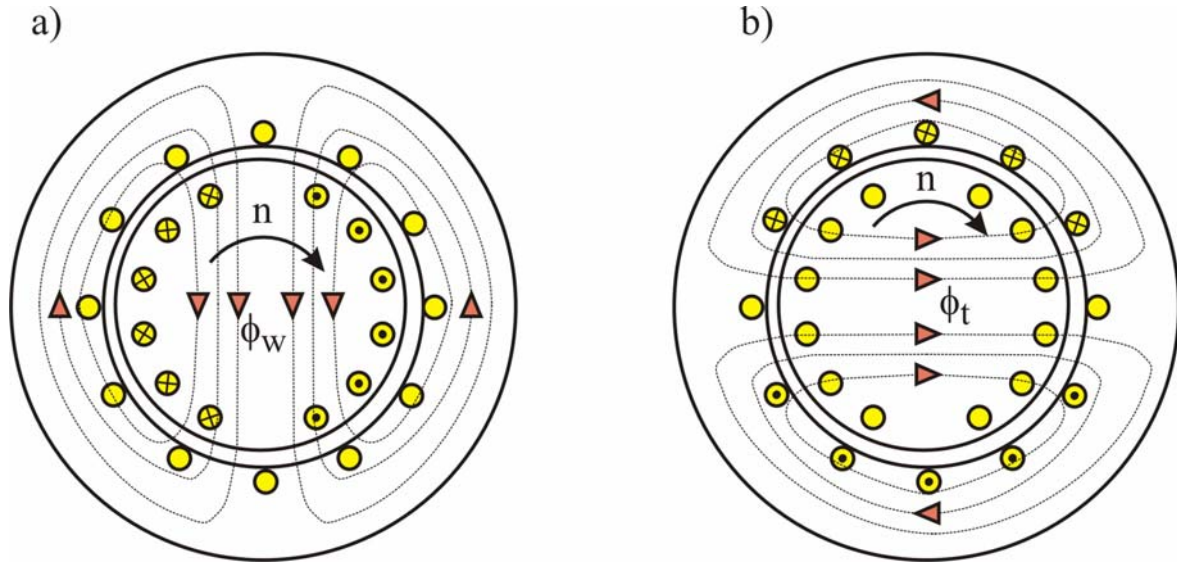
Przebieg charakterystyki biegu jałowego $U_0 = f(I_w)$ (rys.1.5b) jest odzwierciedleniem przebiegu $\phi = f(I_w)$, gdyż zgodnie ze wzorem (1.2), przy stałej prędkości obrotowej, indukowane napięcie jest proporcjonalne do strumienia magnetycznego ϕ . Dla $I_w = 0$ w obwodzie magnetycznym prądnicy istnieje pewien strumień szczątkowy ϕ_r , który indukuje w uzwojeniach twornika prądnicy napięcie szczątkowe E_r . Przy nienasyconym obwodzie magnetycznym ze wzrostem prądu wzbudzenia rośnie w przybliżeniu proporcjonalnie wartość napięcia indukowanego w uzwojeniach twornika prądnicy. Gdy obwód magnetyczny zaczyna się nasycać dalszemu wzrostowi prądu wzbudzenia towarzyszy coraz wolniejszy przyrost napięcia i przebieg charakterystyki $U_0 = f(I_w)$ ma kształt podobny jak krzywa magnesowania z rys.1.4a. Przy zmniejszaniu prądu wzbudzenia, ze względu na histerezę, napięcie indukowane będzie miało nieco większą wartość (przy tych samych prądach) niż przy jego zwiększaniu.

1.1.3. Praca prądnicy synchronicznej pod obciążeniem

Prądnice synchroniczne zwane też generatorami są aktualnie podstawowym źródłem napięcia przemiennego wytwarzanego przez różnego typu elektrownie. W generatorze ma miejsce przetwarzanie energii mechanicznej dostarczonej do jego wału w energię elektryczną prądu przemiennego przekazywanej do odbiorców poprzez sieć energetyczną. Zjawiska zachodzące w prądnicach przy obciążaniu mają istotny wpływ na ich parametry a w konsekwencji na właściwe zarządzanie zasobami energii elektrycznej.

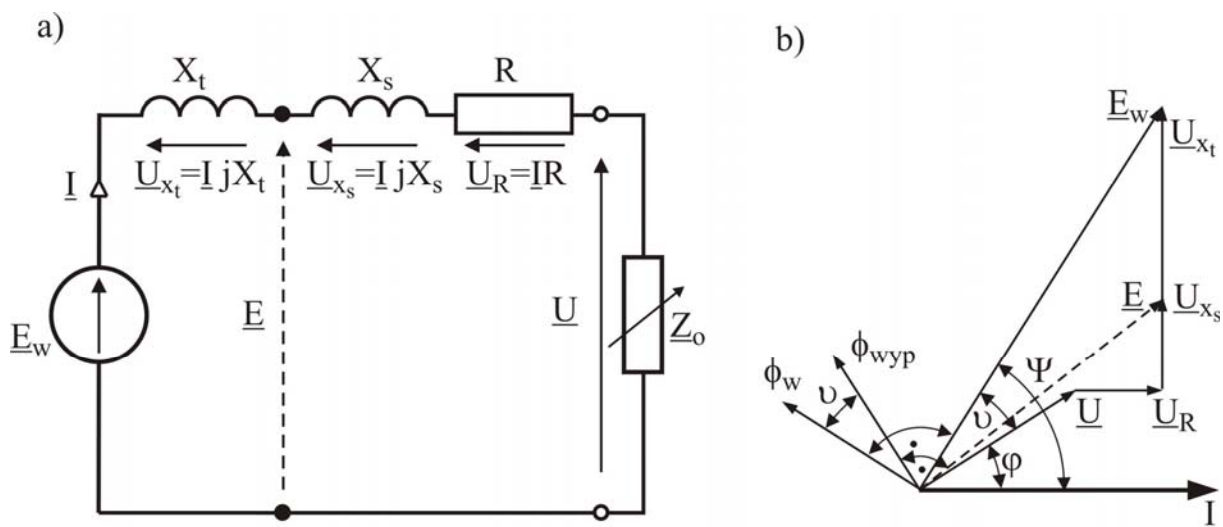
Zjawiska zachodzące w prądnicach w stanie obciążenia symetrycznego zostaną rozpatrzone dla trójfazowej maszyny z biegunami utajonymi na wirniku (cylindrycznej) i uzwojeniami twornika na stojanie. W stanie obciążenia takiej trójfazowej maszyny występują prądy zarówno w uzwojeniu wzbudzenia jak i uzwojeniu twornika, a zatem działają dwa przepływy. W maszynach nienasyconych ($\mu = const$) stosuje się zwykle zasadę superpozycji strumieni. Prąd w uzwojeniach wzbudzenia wytwarza strumień ϕ_w (rys.1.6a), który indukuje w uzwojeniach twornika składową napięcia E_w .

Prąd w uzwojeniu twornika wytwarza strumień magnetyczny, którego linie w przeważającej większości przechodzą ze stojana przez szczelinę powietrzną do wirnika, tworząc tak zwany strumień oddziaływania twornika ϕ_t (rys.1.6b), sprzęgający oba uzwojenia.



Rys.1.6. Obraz składowych linii sił pól magnetycznych w nienasyconej prądnicie z wirnikiem cylindrycznym: obraz linii sił pola wzbudzenia a) i obraz linii sił pola twornika b)

Pozostała część linii pola magnetycznego wytworzonego przez prąd w uzwojeniu twornika sprzęga się wyłącznie z własnym uzwojeniem, tworząc strumień rozproszenia twornika ϕ_s względem wzbudzenia. Takemu podziałowi na strumienie składowe w maszynie cylindrycznej nienasyconej odpowiada schemat zastępczy przedstawiony na rys.1.7a.



Rys.1.7. Schemat zastępczy a) i wykres wskazowy b) maszyny synchronicznej nienasyconej o wirniku cylindrycznym

Na schemacie z rys.1.7 poszczególne symbole oznaczają:

\underline{E}_w - napięcie indukowane w uzwojeniu twornika przez strumień wzbudzenia ϕ_w ,

X_t - reaktancja indukcyjna oddziaływania twornika, odpowiadająca strumieniowi ϕ_t , który indukuje w uzwojeniu twornika napięcie \underline{E}_t ,

X_s - reaktancja rozproszenia twornika, odpowiadająca strumieniowi ϕ_s , który indukuje w uzwojeniu twornika napięcie \underline{E}_s ,

R - rezystancja uzwojenia twornika.

Reaktancja rozproszenia X_s ma praktycznie stałą wartość (przy stałej częstotliwości), gdyż strumień magnetyczny zamyka się przez powietrze. Reaktancję oddziaływania stojana X_t można uznać w maszynie cylindrycznej nienasyconej również jako stałą. Sumę tych reaktancji nazywamy reaktancją synchroniczną X , gdzie

$$X = X_t + X_s. \quad (1.3)$$

Schematowi zastępczemu maszyny cylindrycznej nienasyconej (1.7a) odpowiada wykres wskazowy przedstawiony na rys.1.7b. Wykres sporządzono dla pracy prądnicowej maszyny przy obciążeniu o charakterze indukcyjnym. Wtedy prąd odbiornika opóźnia się względem napięcia o kąt φ . Przy obciążeniu symetrycznym schemat zastępczy jak i wykres wskazowy wystarczy sporządzić dla obwodu jednej fazy. Wykonując wykres wskazowy uwzględniono (zgodnie z rys.1.6a) związek zachodzący między wartościami symbolicznymi napięć w postaci

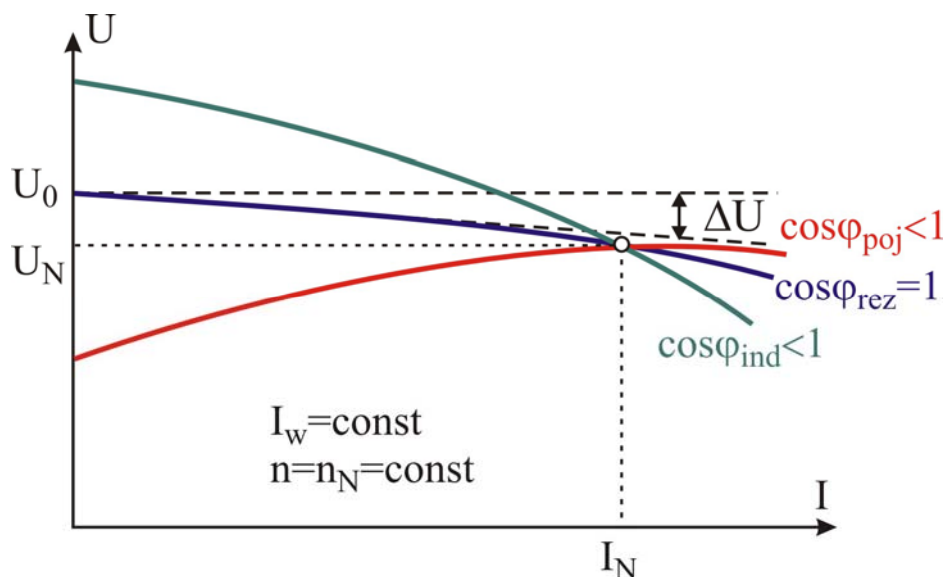
$$\underline{U} = \underline{E}_w - \underline{E}_t - \underline{E}_s - \underline{U}_R \quad (1.4)$$

oraz skorzystano z zasady, że czynny spadek napięcia jest w fazie z prądem, a napięcie na reaktancji indukcyjnej wyprzedza prąd o kąt $\frac{\pi}{2}$.

Podstawową charakterystyką prądnicy synchronicznej jako źródła energii elektrycznej prądu przemiennego jest charakterystyka zewnętrzna $U = f(I)$ tj. zależność napięcia wyjściowego w funkcji prądu pobieranego przez odbiorniki przy stałej prędkości obrotowej n , stałym prądzie wzbudzenia I_w i stałym współczynniku mocy $\cos\varphi$.

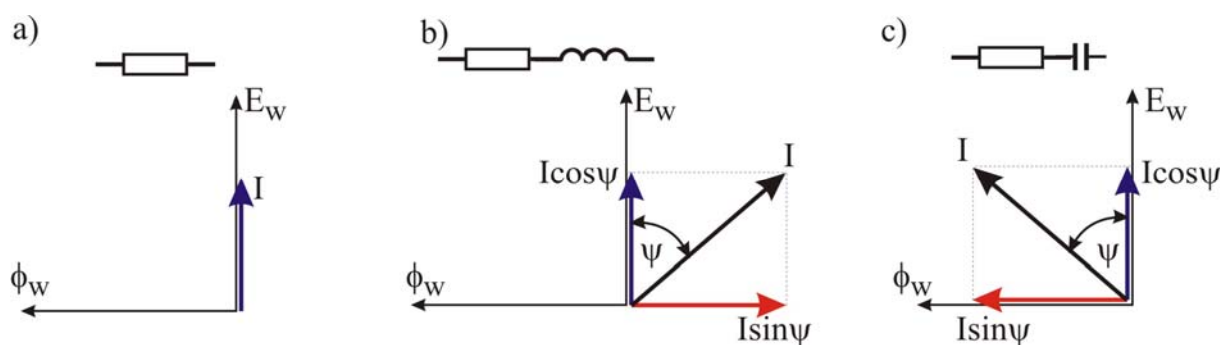
Przebieg napięcia wyjściowego generatora zależy nie tylko od wartości prądu obciążenia, ale i od charakteru impedancji odbiornika tzn. od $\cos\varphi$. Przykładowy przebieg charakterystyk zewnętrznych prądnicy synchronicznej $U = f(I)$ przy obciążeniu: rezystancyjnym ($\cos\varphi = 1$), o charakterze indukcyjnym ($\cos\varphi < 1_{ind}$) i o charakterze

pojemnościowym ($\cos \varphi < 1_{poj}$) przy stałym prądzie wzbudzenia i stałej prędkości obrotowej przedstawia rys.1.8.



Rys.1.8. Przykładowy przebieg charakterystyk zewnętrznych prądnicy synchronicznej

Przy braku obciążenia ($I = 0$) i stałej prędkości obrotowej wartość napięcia indukowanego zależy od prądu wzbudzenia. Wartość tego prądu określa się przy ustalaniu znamionowego punktu pracy. Znamionowy punkt pracy osiąga się regulując prąd wzbudzenia tak, aby przy znamionowym prądzie obciążenia na zaciskach prądnicy było znamionowe napięcie (przy stałej znamionowej prędkości obrotowej).



1.9. Oddziaływanie twornika w prądnicy synchronicznej przy obciążeniu o charakterze: a) rezystancyjnym, b) indukcyjnym, c) pojemnościowym

Napięcie przy obciążeniu czynnym zapisane w postaci symbolicznej określa wzór

$$\underline{U} = \underline{E} - \underline{IZ}. \quad (1.5)$$

Przy obciążeniu czynnym prąd jest w fazie z napięciem ($\cos \varphi = 1$) i wraz ze wzrostem prądu obciążenia przy praktycznie stałym napięciu indukowanym E , napięcie U na zaciskach

prądnicy maleje (rys.1.8). Jest to spowodowane spadkiem napięcia na impedancji Z uzwojenia twornika. Wykres wskazowy ilustrujący oddziaływanie twornika dla tego przypadku przedstawia rys.1.9a.

Dla obciążenia o charakterze indukcyjnym napięcie na odbiorniku przy tym samym prądzie co przy obciążeniu rezystancyjnym ma mniejszą wartość. Jest to spowodowane oddziaływaniem twornika. Przy obciążeniu o charakterze indukcyjnym prąd opóźnia się w fazie względem napięcia i jego składowa bierna $I \sin \psi$ daje przepływ rozmagnesowujący pokazany na rys.1.9b (gdzie ψ jest kątem między wskazem napięcia E_w i prądu I). Powoduje to zmniejszenie wypadkowego strumienia magnetycznego w prądnicy i zgodnie ze wzorem (1.2) zmniejszenie napięcia indukowanego, od którego zależy napięcie na odbiorniku.

Przy obciążeniu o charakterze pojemnościowym wartość napięcia wyjściowego jest większa od wartości napięcia przy obciążeniu rezystancyjnym przy tym samym prądzie, gdyż składowa bierna prądu $I \sin \psi$ daje przepływ zwiększający strumień wypadkowy w obwodzie magnetycznym prądnicy (rys.1.9c). Wzrost strumienia powoduje wzrost napięcia indukowanego przy tej samej prędkości obrotowej, a więc i wzrost napięcia wyjściowego.

1.1.4. Synchronizacja prądnicy synchronicznej z siecią sztywną

Prądnice synchroniczne rzadko pracują indywidualnie. Ma to miejsce zwykle w zespołach prądotwórczych i małych elektrowniach przewoźnych lub laboratoriach badawczych. Przeważająca większość prądnic współpracuje ze sobą w ramach państwowych a często i międzynarodowych układów elektroenergetycznych. Układ energetyczny, w którym pracuje równolegle duża liczba generatorów, ułatwia przesyłanie energii elektrycznej na odległość i umożliwia celowe dostosowywanie się do aktualnego zapotrzebowania mocy. Nadzór nad właściwym rozdziałem obciążeń sprawuje tak zwana dyspozycja mocy.

Bezpieczne przyłączenie prądnicy do pracy równoległej z siecią, na którą pracują inne generatory, polega na doprowadzeniu wartości jej parametrów do parametrów sieci. Będzie miało to miejsce wtedy, gdy chwilowe wartości napięć między poszczególnymi zaciskami prądnicy i odpowiednimi zaciskami sieci będą takie same (przy równych częstotliwościach napięć). W chwili przyłączenia między prądnicy a siecią nie popłyną prądy wyrównawcze. Duże prądy wyrównawcze są szkodliwe zarówno dla prądnicy jak i dla sieci. Nadmiernym prądom towarzyszą bowiem działania elektrodynamiczne, które prowadzą do deformacji

uzwojeń i powstawania dodatkowych momentów obrotowych zakłócających równomierną pracę maszyny. Duże prądy są szkodliwe również dla sieci ze względu na nagłe zmiany napięcia.

Wszystkie stosowane w praktyce sposoby przyłączania prądnicy do synchronicznej pracy równoległej podzielić można na dwie zasadnicze grupy:

- synchronizację,
- samosynchronizację.

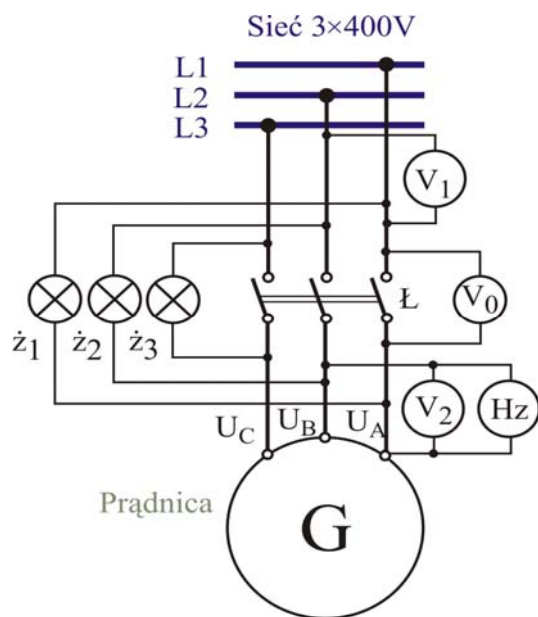
Synchronizacja polega na przyłączeniu do sieci maszyny wzbudzonej i doprowadzonej do stanu bliskiego synchronizmowi. Przy samosynchronizacji przyłączenie twornika maszyny do sieci następuje w stanie niewzbudzonym i przy prędkości wirnika zbliżonej jedynie do prędkości synchronicznej. Generator wzbudza się niezwłocznie po przyłączeniu twornika do sieci. W praktyce najczęściej mamy do czynienia z synchronizacją prądnicy z siecią sztywną (o dużej mocy w stosunku do mocy prądnicy przyłączanej) i w dalszych rozważaniach będziemy zajmowali się tylko tym problemem. Bezpieczne przyłączenie prądnicy do pracy równoległej z siecią będzie miało miejsce wtedy, gdy spełnione będą następujące warunki:

1. równość częstotliwości napięć prądnicy i sieci,
2. równość wartości skutecznych (lub amplitud) napięć prądnicy i sieci,
3. jednakowe następstwo faz (zgodne kierunki wirowania gwiazdy napięć prądnicy i sieci),
4. zgodność faz napięć prądnicy i sieci,
5. jednakowy kształt krzywej napięcia.

Nie spełnienie któregokolwiek z tych warunków powoduje powstanie różnicy napięć między prądnicą i siecią co prowadzi do wystąpienia dużych prądów wyrównawczych niebezpiecznych zarówno dla prądnicy jak i dla sieci.

W elektrowniach przyłączanie pojedynczych generatorów do współpracy z siecią energetyczną odbywa się za pomocą specjalnych układów ułatwiających synchronizację. W laboratorium synchronizację prądnicy z siecią możemy przeprowadzić za pomocą układu żarówek w układzie „na ciemno” lub „na światło wirujące”. Schemat przyłączenia żarówek do synchronizacji prądnicy z siecią w układzie „na ciemno” przedstawia rys.1.10.

Przed przystąpieniem do synchronizacji należy zdać sobie sprawę z faktu, że nie mamy wpływu na parametry sieci (sieć jest sztywna) i dlatego musimy dostosować parametry prądnicy do parametrów sieci. Jednakowy kształt krzywej napięcia zapewniają konstruktorzy generatorów i ten warunek przy synchronizacji może być pominięty.



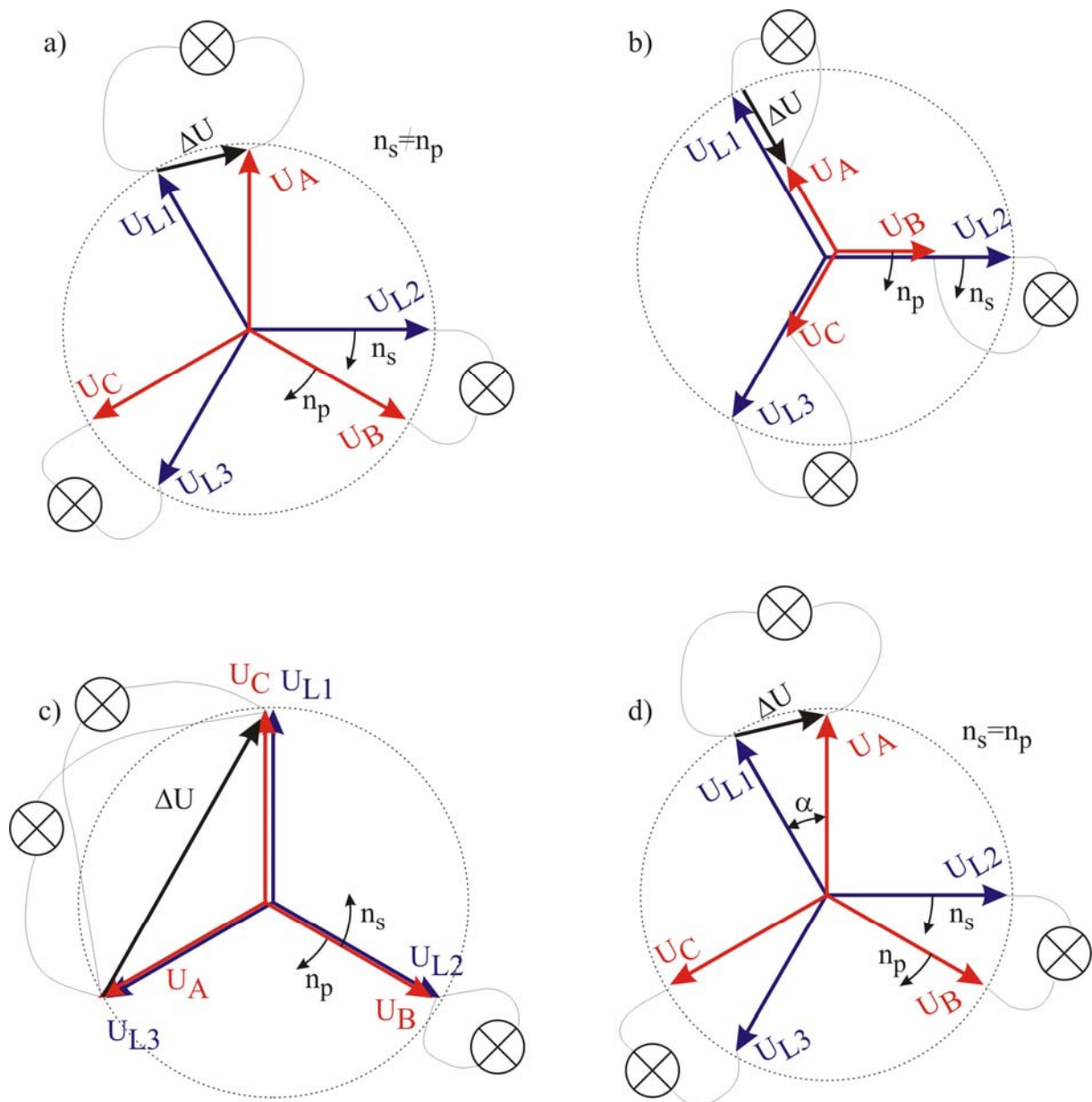
Rys.1.10. Układ do synchronizacji prądnic z siecią z wykorzystaniem żarówek w układzie „na ciemno”

Synchronizację praktycznie najlepiej rozpocząć od rozpedzenia prądnic do prędkości bliskiej prędkości synchronicznej poprzez regulację prędkości obrotowej silnika napędowego tak, aby częstotliwość napięcia prądnic była w przybliżeniu równa częstotliwości sieci (spełniony warunek 1). Przy różnych częstotliwościach gwiazdy napięć prądnic i sieci wirują z różnymi prędkościami ($n_s \neq n_p$) dając zmieniającą się w czasie różnicę napięć między odpowiadającymi sobie fazami prądnic i sieci (rys.1.11a)

Wartość skuteczna napięcia przy stałej prędkości obrotowej (zgodnie ze wzorem 1.2) zależy od strumienia magnetycznego. Zmieniając prąd wzbudzenia magnesnicy zmieniamy strumień tak, aby wartość skuteczną napięcia prądnic zrównać z wartością skuteczną napięcia sieci spełniając w ten sposób drugi warunek. Niespełnienie tego warunku skutkuje powstaniem różnicy napięć ΔU między prądnicą i siecią, co zostało zobrazowane na rys.1.11b.

Jednakowe następstwo faz prądnic i sieci sprawdzamy przy pomocy żarówek połączonych w układzie na ciemno. Jednoczesne zapalenie i gaśnięcie żarówek świadczy o właściwym następstwie faz (spełniony warunek 3). W przypadku, jeśli żarówki będą zapalały się i gasły stwarzając wrażenie wirowania światła następstwo faz jest nieprawidłowe i powstaje wtedy różnica napięć między prądnicą i siecią. Przy niewłaściwym następstwie faz gwiazdy napięć prądnic i sieci wirują w przeciwnych kierunkach. Różnica napięć między prądnicą i siecią będzie się więc zmieniała osiągając największą wartość w sytuacji pokazanej

na rys.1.11c. Właściwe następstwo faz można wtedy uzyskać poprzez zamianę między sobą dwóch dowolnych przewodów (faz) prądnicy lub sieci.



Rys. 1.11. Pojawianie się różnicy napięć między prądnicą i siecią przy: a) różnicy częstotliwości, b) różnicy wartości skutecznych napięć, c) niejednakowym następcie faz, d) niezgodności faz.

Przy niezgodności faz (warunek 4) wystąpi również różnica napięć zależna od kąta α między gwiazdami napięć prądnicy i sieci. Mechanizm powstawania tej różnicy napięć jest przedstawiony na rys.1.11d. Spełnienie w pełni warunku zgodności faz jest w praktyce bardzo trudne do zrealizowania. Po spełnieniu warunków 1-3 należy regulować prędkość obrotową prądnicy tak, aby doprowadzić do bardzo wolnego zapalania się i gaśnięcia żarówek. Gdy żarówki zgasną a wskazówka woltomierza zerowego V_0 zbliży się do zera (uzyskujemy w

przybliżeniu zgodność faz napięć prądnicy i sieci) załączamy łącznik główny przyłączając prądnicę synchroniczną do pracy równoległej z siecią.

1.1.5. Współpraca prądnicy synchronicznej z siecią sztywną

Napięcie i częstotliwość prądnicy pracującej równoległe z siecią nie mogą zmieniać się dowolnie i zawsze mają tę samą wartość co napięcie i częstotliwość sieci. Po zsynchronizowaniu prądnicy z siecią gwiazdy napięć prądnicy i sieci wirują z tą samą prędkością i pokrywają się. Między prądnicą i siecią nie płyną wtedy żadne prądy. Do prądnicy doprowadzona jest z zewnątrz moc mechaniczna napędzająca jej magneśnicę oraz moc elektryczna prądu stałego powodująca przepływ prądu wytwarzającego stały strumień magnetyczny wzbudzający generator. Na współpracę prądnicy z siecią ma więc wpływ moment obrotowy (moc) przyłożony do wału oraz wartość prądu wzbudzenia uzwojenia magneśnicy.

Zastanówmy się na początku jaki wpływ na współpracę prądnicy z siecią będzie miała zmiana prądu wzbudzenia. Wzrost prądu wzbudzenia powoduje zwiększenie strumienia magnetycznego w obwodzie magnetycznym prądnicy i zgodnie ze wzorem (1.2) wzrost napięcia indukowanego. Napięcie prądnicy równe napięciu sieci nie może się zmienić (połączenie równoległe) i prądnica odda do sieci prąd bierny indukcyjny a pobierze z sieci prąd bierny pojemnościowy. Dzieje się tak dlatego, że przy wzroście prądu magnesującego prądnica ma nadmiar mocy indukcyjnej. Zwiększanie prądu wzbudzenia powoduje pogorszenie współczynnika mocy $\cos\varphi$ sieci, co jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym.

Zmniejszanie prądu wzbudzenia prądnicy spowoduje niedobór prądu magnesującego i zmniejszenie napięcia indukowanego w tworniku. Napięcie sieci dalej pozostaje niezmiennie, więc prądnica musi uzupełnić brakujący strumień i pobierze z sieci prąd bierny indukcyjny (zwiększając indukowane napięcie do poziomu napięcia sieci) a odda prąd bierny pojemnościowy.

Ze względu na omówione własności niedowzbudzona prądnica w elektrowniach jest często wykorzystywana jako kompensator mocy biernej (podobnie jak baterie kondensatorów). Z powyższych rozważań wynika, że zmiana prądu wzbudzenia generatora powoduje wymianę tylko mocy biernej między prądnicą i siecią.

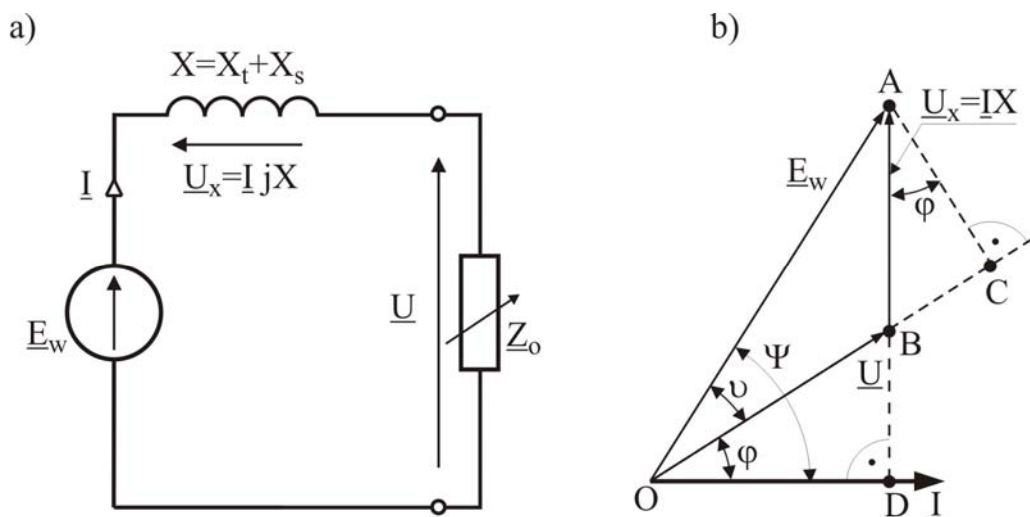
Wymiana mocy czynnej między prądnicą a siecią może mieć miejsce tylko wtedy, gdy będziemy zmieniali moc czynną dostarczoną do prądnicy.

Stała prędkość obrotowa wału może mieć miejsce tylko wtedy, gdy suma momentów na wale jest równa zero (moment napędowy jest równy sumie momentów oporowych). Zwiększenie momentu doprowadzonego do wału generatora spowoduje chwilowe zachwianie tej równowagi i wirnik prądnicy przyspieszy powodując, że gwiazda napięć prądnicy wyprzedzi gwiazdę napięć sieci o kąt ν . Między prądnicą a siecią wystąpi wtedy różnica napięć i prądnica odda moc czynną do sieci. Wzrośnie wtedy elektromagnetyczny moment hamujący wytworzony przez generator do wartości równoważącej wzrost momentu napędowego i prędkość obrotowa pozostanie stała równa prędkości synchronicznej. Wartość mocy czynnej oddanej do sieci jest zależna od kąta ν , a więc od wartości mocy mechanicznej doprowadzonej do prądnicy.

Zmniejszenie momentu doprowadzonego do wału prądnicy spowoduje, że gwiazda napięć prądnicy opóźni się względem gwiazdy napięć sieci o kąt ν i prądnica zacznie pobierać moc czynną z sieci. Maszyna przejdzie wtedy w stan pracy silnikowej i będzie pracowała jako silnik synchroniczny, którego prędkość obrotowa określona jest wzorem

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1.6)$$

Ze wzoru widać, że prędkość obrotowa silnika synchronicznego zależy tylko od częstotliwości f napięcia zasilającego i od liczby par biegunów p a nie zależy od obciążenia.



Rys.1.12. Uproszczony schemat zastępczy a) i wykres wskazowy b) maszyny synchronicznej nienasyconej z biegunami utajonymi

W celu określenia mocy elektrycznej i momentu w maszynie synchronicznej posłużono się uproszczonym schematem zastępczym i wykresem wskazowym z rys.1.7. Dla ułatwienia rozważań pominięty zostanie spadek napięcia na rezystancji uzwojeń twornika a reaktancje

X_t i X_s zostaną zastąpione reaktancją synchroniczną $X = X_t + X_s$. Schemat zastępczy i wykres wskazowy przy tych założeniach przedstawia rys.1.12.

Posługując się wartościami skutecznymi moc elektryczna trójfazowej prądnicy może być wyznaczona z zależności

$$P = 3UI \cos \varphi. \quad (1.7)$$

Moc ta może być uzależniona od pewnego kąta ν zawartego między osią biegunów magnesu i osią wirującego pola magnetycznego wytworzonego przez prąd oddawany przez prądnicę do odbiorników. Na wykresie wskazowym (rys.1.12b) kąt ten jest zawarty między wskazami \underline{E}_w i \underline{U} . Z trójkąta ABC z rys.1.12b wynika zależność

$$\cos \varphi = \frac{AC}{AB}. \quad (1.8)$$

Z trójkąta OAC można wyznaczyć AC jako

$$AC = E_w \sin \nu. \quad (1.9)$$

Podstawiając we wzorze (1.8) za AC zależność (1.9) i uwzględniając, że $AB = U_x = IX$ otrzymamy

$$\cos \varphi = \frac{E_w \sin \nu}{IX}. \quad (1.10)$$

Podstawiając zależność (1.10) do wzoru (1.7) otrzymamy przybliżoną zależność na moc elektryczną maszyny synchronicznej trójfazowej

$$P = 3U \frac{E_w \sin \nu}{X}. \quad (1.11)$$

Zależność między mocą i momentem w ruchu obrotowym określona jest wzorem

$$P = M\omega \quad (1.12)$$

gdzie $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ jest prędkością kątową wirującej maszyny a n prędkością obrotową magnesu w obrotach na minutę.

Korzystając z zależności (1.11) i (1.12) oraz uwzględniając, że $f = \frac{pn}{60}$ wzór na moment przyjmie ostateczną postać

$$M = \frac{3p}{2\pi f} \frac{UE_x}{X} \sin \nu \quad (1.13)$$

Przy stałym wzbudzeniu ($I_w = const$) i stałym napięciu sieci (praca równoległa z siecią sztywną) moment obrotowy jest funkcją tylko jednej zmiennej

$$M = M_m \sin \nu \quad (1.14)$$

gdzie stała $M_m = \frac{3p}{2\pi f} \frac{UE_x}{X}$ jest maksymalną wartością (amplitudą) momentu.

Moment wyrażony wzorem (1.13) w przypadku pracy prądnicowej jest momentem hamującym a w przypadku pracy silnikowej momentem napędowym.

Zmniejszenie momentu doprowadzonego lub odłączenie mocy mechanicznej doprowadzanej do prądnicy zsynchronizowanej z siecią powoduje jej przejście w stan pracy silnikowej. Moment obrotowy wyrażony wzorem (1.14) będzie w tym przypadku momentem napędowym. Maszyna synchroniczna jest więc maszyną odwracalną i może pracować zarówno jako prądnica i jako silnik. Silnik synchroniczny o klasycznej budowie ma istotną wadę a mianowicie nie wytwarza własnego momentu rozruchowego, dlatego jego praktyczne wykorzystanie jest znacznie ograniczone.

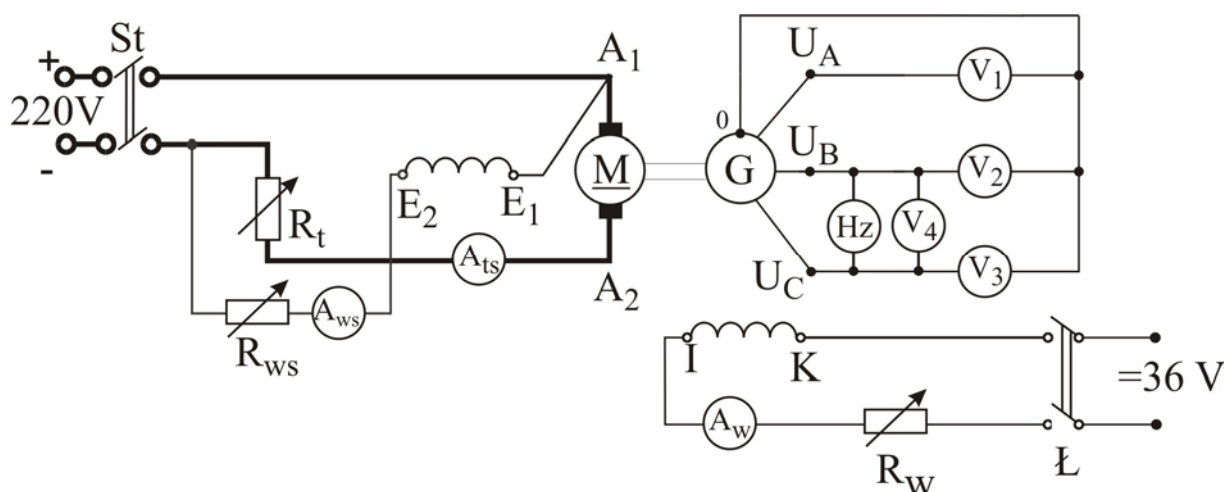
1.2. Badania laboratoryjne

1.2.1. Pomiar charakterystyki biegu jałowego

Charakterystyka biegu jałowego $U_0 = E = f(I_w)$ przedstawia zależność siły elektromotorycznej E indukowanej w uzwojeniu twornika przy biegu jałowym (prąd obciążenia $I = 0$) od prądu wzbudzenia I_w , przy znamionowej prędkości obrotowej $n = n_N = const$. Napięcie U_0 na zaciskach prądnicy przy biegu jałowym jest równe sile elektromotorycznej E indukowanej w uzwojeniu twornika.

Pomiarów charakterystyki biegu jałowego dokonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rys.1.13. Silnikiem napędzającym prądnice synchroniczną jest silnik bocznikowy prądu stałego. Przed przystąpieniem do pomiarów należy dokonać rozruchu silnika. Rozruchu dokonujemy za pomocą rozrusznika lub rezystora włączonego szeregowo w obwód twornika w celu ograniczenia prądu rozruchowego. Przed podaniem napięcia na silnik przez zamknięcie stycznika St należy rezystor rozruchowy R_r lub rozrusznik ustawić na największą rezystancję, a zewrzeć rezystor R_{ws} w obwodzie wzbudzenia. Po załączeniu stycznika i sprawdzeniu czy w obwodzie wzbudzenia pojawił się prąd, zmniejszamy rezystancję rezystora rozruchowego aż do zwarcia. Silnik w tym czasie rozpędza się i po rozruchu ustala się jego prędkość obrotowa. Znamionową prędkość obrotową zapewniającą częstotliwość indukowanego napięcia prądnicy synchronicznej równą 50 Hz ustawiamy za

pomocą rezystora R_{ws} włączonego w obwód wzbudzenia silnika (im mniejsza rezystancja tym wyższa prędkość obrotowa i wyższa częstotliwość napięcia generatora).



Rys.1.13. Schemat układu pomiarowego do badania charakterystyki biegu jałowego

Podczas pomiarów prędkość obrotową utrzymuje się na stałym poziomie, aby zapewnić stałą częstotliwość napięcia prądnicy wynoszącą 50 Hz. Pierwszego pomiaru napięcia szczytkowego dokonujemy przy otwartym łączniku Ł. W następnej kolejności zamykamy obwód wzbudzenia prądnicy przy maksymalnej wartości rezystancji R_w i zwiększamy prąd wzbudzenia I_w do takiej wartości, aby napięcie osiągnęło wartość rzędu $1,2U_N$.

$n = 1500 \text{ obr/min}, I_{obc} = 0$

Tabela 1

Lp.	I_w	U_1	U_2	U_3	U_{sr}	I_w	U_1	U_2	U_3	U_{sr}
	A	V	V	V	V	A	V	V	V	V
Przy wzroście prądu					Przy zmniejszaniu prądu					
1										
2										
3										
...										

Dla określonych wartości prądu wzbudzenia odczytujemy wartości napięć indukowanych na woltomierzach V_1, V_2, V_3 . Identycznych pomiarów dokonujemy przy zmniejszaniu prądu wzbudzenia. W ostatnim pomiarze odczytujemy napięcia przy otwartym łączniku Ł. Wyniki pomiarów notujemy w tabeli 1.

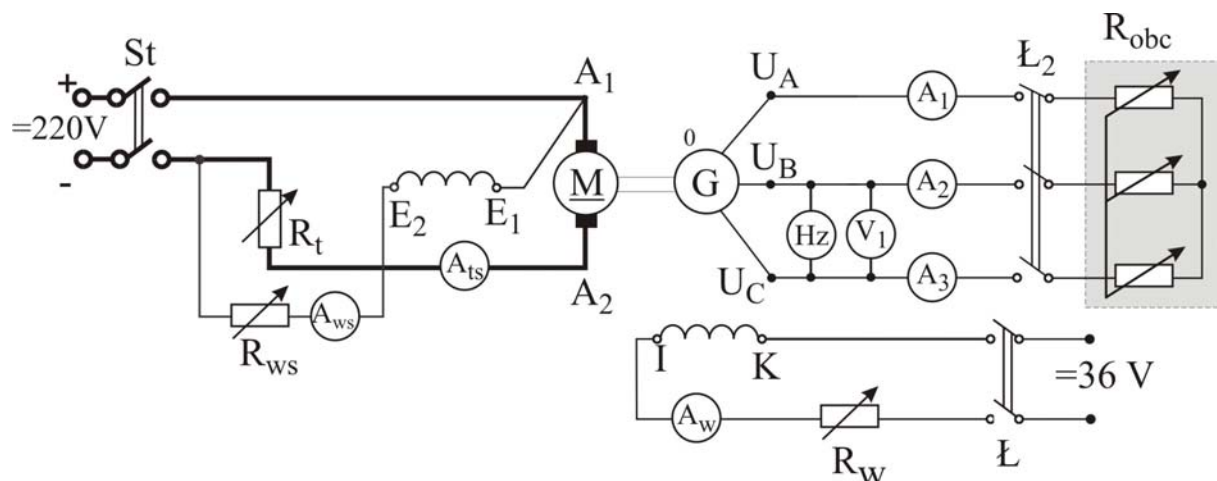
Przy stałej prędkości obrotowej średnia wartość napięcia jest proporcjonalna do wartości strumienia wypadkowego zgodnie ze wzorem (1.2), a mianowicie $E = c_E \phi$, gdzie c_E jest wartością stałą. Charakterystyka biegu jałowego ma więc taki sam kształt przebiegu jak charakterystyka magnesowania prądnic $\phi = f(I_w)$.

Po obliczeniu średniej arytmetycznej napięć fazowych U_{sr} należy wykreślić przebiegi krzywej $U_{sr} = f(I_w)$ przy prądzie narastającym oraz przy prądzie malejącym w jednym układzie współrzędnych. Przy prądzie wzbudzenia zmniejszanym od wartości maksymalnej do zera, krzywa $U_{sr} = f(I_w)$ (na skutek histerezy) przebiega wyżej niż przy prądzie magnesującym zmienianym od zera do maksimum.

Przykładowy przebieg charakterystyki biegu jałowego prądnicy synchronicznej przedstawiono na rys. 1.5b, a uzasadnienie tego przebiegu w punkcie 1.1.2.

1.2.2. Pomiar charakterystyki zewnętrznej prądnicy

Charakterystyką zewnętrzną prądnicy synchronicznej nazywamy zależność napięcia wyjściowego w funkcji prądu pobieranego przez odbiornik $U = f(I)$ przy stałej prędkości obrotowej n , stałym prądzie wzbudzenia I_w i stałym współczynniku mocy $\cos \varphi$.



Rys.1.14. Schemat układu pomiarowego do pomiaru charakterystyk zewnętrznych przy obciążeniu czynnym

Prądnica synchroniczna będzie obciążana rezystorem wodnym stanowiącym odbiornik czynny tj. przy $\cos \varphi = 1$. Przed przystąpieniem do pomiarów łączymy układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.1.14, a następnie dokonujemy rozruchu silnika

napędowego i ustalamy wartość prędkości obrotowej tak, aby częstotliwość napięcia indukowanego w prądnicie była równa 50 Hz.

Pomiary rozpoczynamy od znalezienia znamionowego punktu pracy polegającego na ustawieniu takiego prądu wzbudzenia prądnicy, aby przy znamionowym napięciu wyjściowym przez odbiornik płynął znamionowy prąd. Wykonujemy to w ten sposób, że po ustaleniu prędkości obrotowej zapewniającej częstotliwość indukowanego napięcia równą 50Hz zamykamy łącznik Ł_1 i zwiększamy prąd wzbudzenia aż do osiągnięcia napięcia znamionowego prądnicy. Następnie przy maksymalnej rezystancji odbiornika należy zamknąć łącznik Ł_2 i zmniejszając rezystancję trójfazowego opornika (np. wodnego) zwiększać prąd obciążenia utrzymując jednocześnie znamionowe napięcie wyjściowe (przez zwiększanie prądu wzbudzenia generatora) przy stałej prędkości obrotowej prądnicy. Po osiągnięciu znamionowego prądu obciążenia przy znamionowym napięciu prądnicy przestajemy regulować jej prąd wzbudzenia, gdyż osiągnięty został znamionowy punkt pracy. Przeciążamy prądnicę zwiększając prąd obciążenia do około 1,2 prądu znamionowego a następnie odczytujemy wartości amperomierzy i woltomierza przy zmniejszaniu prądu obciążenia do zera. Ostatni pomiar wykonujemy przy odłączonym łączniku Ł_2 utrzymując przez cały czas pomiarów stałą częstotliwość napięcia prądnicy. Wyniki pomiarów notujemy w tabeli 2.

$f = 50\text{Hz}, I_w = \text{const}$

Tabela 2

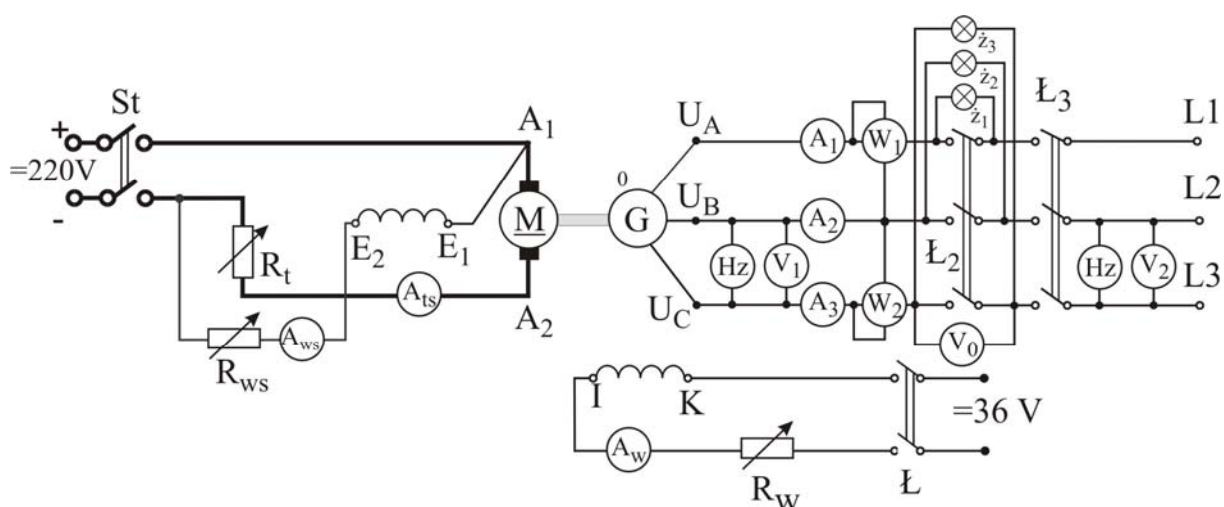
Lp.	U	I_1	I_2	I_3	I_{sr}
	V	A	A	A	A
1.					
2.					
3.					
...					

Pomiarów napięcia i prądów należy dokonywać szybko i jednocześnie ze wszystkich przyrządów, gdyż ze względu na dużą moc prądnicy woda w rezystorze wodnym szybko się nagrzewa i zmienia się rezystancja obciążenia co powoduje zmianę wartości prądów odbieranych z prądnicy i napięcia wyjściowego. Wynika z tego, że im krócej będzie trwał pomiar tym dokładniej będzie odwzorowana charakterystyka zewnętrzna prądnicy synchronicznej.

W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów należy wykreślić w układzie współrzędnych prostokątnych charakterystykę zewnętrzną prądnicy $U_1 = f(I_{\dot{s}r})$ przy stałym prądzie wzbudzenia i stałej częstotliwości. Przykładowy przebieg charakterystyki zewnętrznej przedstawia rys.1.8, a uzasadnienie tego przebiegu zawarte jest w punkcie 1.1.3.

1.2.3. Synchronizacja prądnicy synchronicznej z siecią sztywną

Synchronizacja prądnicy synchronicznej z siecią sztywną zostanie przeprowadzona za pomocą żarówek w tzw. „układzie na ciemno”. Schemat elektryczny układu do synchronizacji prądnicy z siecią sztywną przedstawiono na rys.1.15.



Rys.1.15. Schemat układu do synchronizacji i badania prądnicy współpracującej z siecią sztywną za pomocą żarówek w „układzie na ciemno”

Przed przystąpieniem do synchronizacji należy połączyć układ zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.1.15. Ze względu na to, że moc sieci jest bardzo duża (w stosunku do mocy prądnicy) i na jej parametry nie mamy wpływu, to musimy parametry prądnicy dopasować do parametrów sieci spełniając warunki jej bezpiecznego przyłączenia do pracy równoległej z siecią.

Przy otwartych łącznikach Ł_1 , Ł_2 , Ł_3 dokonujemy rozruchu silnika napędowego (sposób rozruchu opisano w p.1.2.1) i regulujemy prędkość obrotową tak, aby zapewnić częstotliwość indukowanego napięcia prądnicy równą 50Hz. W ten sposób spełniamy warunek równości częstotliwości prądnicy i sieci. W następnej kolejności zamykamy łącznik Ł_1 i regulując prąd wzbudzenia ustawiamy wartość skuteczną napięcia prądnicy równą napięciu sieci spełniając drugi warunek dotyczący równości wartości skutecznych napięć.

Właściwe następstwo faz możemy sprawdzić za pomocą układu żarówek np. „na ciemno”. Po zamknięciu łącznika L_3 obserwujemy światło żarówek. Jednoczesne zapalenie i gaśnięcie żarówek świadczy o właściwym następstwie faz. Jeżeli żarówki po kolei zapalają się i gasną tworząc wrażenie światła wirującego to następstwo faz jest niewłaściwe i wtedy trzeba zamienić ze sobą dwie dowolne fazy prądnicy lub sieci. Zamiany dwóch dowolnych przewodów fazowych należy dokonać przy odłączonym napięciu sieci wyłączonym wzbudzeniu prądnicy.

Przyłączenie prądnicy do sieci jest możliwe po spełnieniu ostatniego warunku zgodności faz. Warunek ten będzie spełniony, gdy żarówki zgasną a woltomierz V_0 wskaże zerowe napięcie. Spełnienie długotrwale tego warunku jest praktycznie niemożliwe i dlatego należy przez powolną regulację prędkości obrotowej silnika doprowadzić do bardzo wolnego zapalania i gaśnięcia żarówek. Gdy żarówki gasną a wskazanie woltomierza zerowego zbliża się do zera należy zamknąć łącznik L_2 przyłączając prądnicę synchroniczną do pracy równoległej z siecią.

1.2.4. Badanie wymiany mocy między prądnicą synchroniczną i siecią

Sieć energetyczna jest zasilana przez wiele zsynchronizowanych ze sobą prądnic synchronicznych. Między każdą prądnicą synchroniczną a siecią sztywną ma miejsce wymiana mocy biernej lub mocy czynnej. Wymiana tej mocy zależy od wartości prądu wzbudzenia (magneśnicy) lub momentu doprowadzonego do wału prądnicy.

Zmiana prądu wzbudzenia prądnicy synchronicznej współpracującej z siecią nie powoduje wymiany mocy czynnej a tylko wymianę mocy biernej. Zwiększanie prądu wzbudzenia prądnicy spowoduje oddanie przez prądnice do sieci nadmiaru mocy indukcyjnej i pobranie z sieci mocy pojemnościowej. Zjawisko to z energetycznego punktu widzenia jest bardzo niekorzystne, gdyż pogarsza $\cos\varphi$ sieci. Zmniejszenie zaś prądu wzbudzenia prądnicy powoduje pobranie z sieci brakującej mocy indukcyjnej a oddanie do sieci mocy pojemnościowej. Niedowzbudzona prądnicą jest często w praktyce wykorzystywana w elektrowniach jako kompensator mocy biernej.

Wymiana mocy czynnej między prądnicą i siecią zachodzi tylko przy zmianie mocy mechanicznej doprowadzonej do generatora. Zmianę mocy doprowadzonej do prądnicy w badanym układzie pomiarowym można uzyskać przez zmianę prądu wzbudzenia silnika napędowego. Zmniejszenie prądu wzbudzenia silnika bocznikowego prądu stałego powoduje

zwiększenie momentu doprowadzonego do wału prądnicy. Wirnik prądnicy wtedy przyspieszy i gwiazda napięć prądnicy wyprzedzi gwiazdę napięć sieci. Prądnica odda w tym przypadku do sieci elektryczną moc czynną. Zmniejszając moc doprowadzoną do generatora lub odłączając napęd gwiazda napięć prądnicy opóźni się w stosunku do gwiazdy napięć sieci i prądnica przejdzie w stan pracy silnikowej pobierając z sieci elektryczną moc czynną. Bardziej szczegółowe uzasadnienie powyższych stwierdzeń przedstawione zostało w punkcie 1.1.4.

W ramach badań współpracy prądnicy z siecią należy:

- zwiększając a następnie zmniejszając prąd wzbudzenia prądnicy obserwować wymianę mocy biernej między prądnicą i siecią poprzez obserwację wskazań watomierzy i prądu pobieranego z sieci przez silnik napędowy,
- zwiększając moment napędowy zaobserwować oddawanie mocy czynnej przez prądnicę do sieci poprzez obserwację wskazań przyrządów pomiarowych,
- zmniejszając moment napędowy a następnie odłączając napęd prądnicy prześledzić pracę silnikową maszyny synchronicznej.

Wnioski z powyższych obserwacji dotyczące wymiany mocy biernej i czynnej między prądnicą i siecią oraz sposób spełnienia warunków synchronizacji za pomocą żarówek w „układzie na ciemno” zamieścić we wnioskach sprawozdania.