

TURBOZESPOŁY O REGULOWANEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ W ELEKTROWNIACH POMPOWO-SZCZYTOWYCH

Elektrownie szczytowo-pompowe są obecnie jedyną dojrzałą technologią magazynowania energii elektrycznej na skalę przemysłową. Nieustanny wzrost wykorzystania odnawialnych źródeł energii wiąże się z koniecznością kompensacji coraz większych ilości mocy w coraz krótszym czasie, na co odpowiedzą są wywodzące się z Japonii turboszespoły pompowo-szczytowe o regulowanej prędkości obrotowej.

Odnawialne źródła energii stały się nieodzowną częścią współczesnych sieci elektrycznych. Moc dostarczana przez turbiny wiatrowe i ogniwa fotowoltaiczne jest jednakże znacznie bardziej zmienna aniżeli wytwarzana w tradycyjny sposób. Stwarza to potrzebę zrównoważenia tej zmienności poprzez wprowadzenie do systemu energetycznego źródeł mocy mogących odpowiednio szybko i niezawodnie zareagować na takie zmiany. Konwencjonalne turboszespoły wodne mogą regulować moc wytwarzaną poprzez regulację otwarcia łopatek kierownicy, a więc regulowanie ilości przepływającej wody. Szybkość odpowiedzi na zapotrzebowanie zależy od parametrów konstrukcyjnych maszyny i rzadko przekracza 10 MW/s. Nie jest to wystarczające w sytuacjach, gdzie potrzebna jest szybsza reakcja na zmiany mocy. Odpowiedzią na to są turboszespoły pompowo-szczytowe o regulowanej prędkości obrotowej. Zmiana prędkości obrotowej pozwala na użycie energii zgromadzonej w masie wirującej maszyny.

Regulowana prędkość obrotowa turboszespołów odwracalnych w elektrowniach pompowo-szczytowych kojarzy się obecnie z dążeniem do kompensacji zmienności mocy ze źródeł odnawialnych. Większość budowanych obecnie elektrowni w zachod-

niej Europie wyposażona będzie w takie systemy.

Artykuł ten oparty jest na doświadczeniach autora w pracy z jednym z czołowych dostawców turboszespołów odwracalnych o regulowanej prędkości obrotowej. Przedstawione tu informacje oparte są na materiałach przedstawionych podczas seminariów na ten temat [1], [2].

PODSTAWY

Konwencjonalne turboszespoły pompowo-szczytowe mają wiele zalet, za sprawą których pozwoliły one na akumulowanie energii na skalę przemysłową. Mają one także szereg ograniczeń. W ruchu turbinowym, praktyczna minimalna moc ograniczona jest do około 50% mocy nominalnej. Poniżej tej wartości, zjawiska hydrodynamiczne w rurze ssącej powodują niestabilną pracę pompoturbiny.

W ruchu pompowym konwencjonalne turboszespoły pompowo-szczytowe ze względu na stałą prędkość obrotową nie pozwalają na regulację pobieranej mocy.

W ruchu pompowym, stała prędkość obrotowa nie pozwala na regulację pobieranej

mocy. Tak więc pompowanie nastąpić może jedynie wówczas, gdy dysponowana moc jest równa lub większa aniżeli moc pobierana przez pompoturbinę.

Zmienna prędkość obrotowa pozwala na znaczne zmniejszenie tych limitów. Ponieważ moc pobierana w ruchu pompowym jest proporcjonalna do prędkości obrotowej w trzeciej potęgę, niewielkie zmiany prędkości prowadzą do znacznych zmian pobieranej mocy. W praktycznych zastosowaniach zakres zmiany prędkości obrotowej dobrany jest w ten sposób, ażeby otrzymać regulację mocy pompowania od około 60% do 100% mocy nominalnej. Większy zakres zmian nie jest praktyczny, ponieważ byłby ograniczony zjawiskami hydrodynamicznymi w wirniku: wirującym oderwaniem i kawitacją.

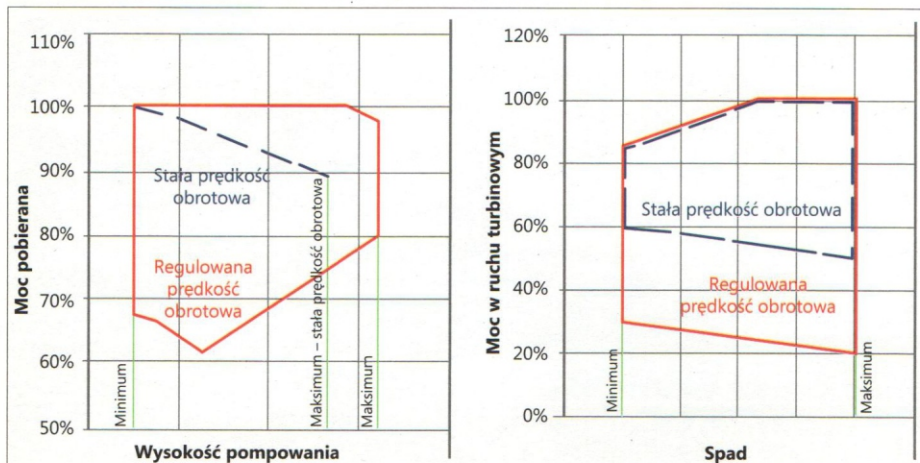
W ruchu turbinowym regulowana prędkość obrotowa także przynosi korzyści, aczkolwiek nie tak wyraźne jak w ruchu pompowym. Pierwszą z nich jest możliwość zwiększenia sprawności hydraulicznej. Trójkąty prędkości na wlocie i wylocie wirnika w optymalnych warunkach pracy określają, że optymalna energia właściwa w obu kierunkach ruchu powiązana jest równaniem,

$$E_t = \frac{E_p}{\eta_t \eta_p}$$

w którym E oznacza jednostkową energię hydrauliczną ($E = gH$, gdzie g – przyspieszenie ziemskie, H – spadek), η – sprawność hydrauliczną. Indeks „t” oznacza ruch turbinowy, „p” – ruch pompowy.

Z równania tego wynika, że optymalna energia właściwa (a także spadek) w ruchu turbinowym będzie zawsze większa niż w ruchu pompowym (zarówno η_t , jak i η_p są zawsze mniejsze od jedności). Tak więc przy stałej prędkości obrotowej, zaspokojenie restrykcji związanych z bardziej wyma-

Typowy zakres pracy pompoturbiny o stałej i regulowanej prędkości obrotowej



gającym ruchem pompowym oznacza, że w ruchu turbinowym maszyna odwracalna pracuje zawsze pod niższym spadem niżeli spad optymalny.

Zamiana prędkości obrotowej pompoturbin (bardziej konkretnie, obniżenie tej prędkości) pozwala na pracę bliżej szczytu pągórka sprawności, zapewniając tym wyższą sprawność. Różnica ta nie jest duża, rzędu 1% do 2%, zależnie od parametrów pracy w ruchu turbinowym.

Ponadto, regulacja prędkości obrotowej w ruchu turbinowym pozwala na dobranie parametrów pracy w taki sposób, ażeby ograniczyć intensywność pulsacji ciśnienia w rurze ssącej. Oznacza to praktycznie możliwość regulowania mocy od około 20% do 100% mocy nominalnej (zakres regulacji zależy też od spadu).

POCZĄTKI

Pierwsze przykłady użycia regulowanej prędkości obrotowej pompoturbin pochodzą z Japonii, gdzie struktura sieci energetycznej jest bardzo odmienna od obecnych potrzeb europejskich. W roku 1985 Tokyo Electric Power Co. (TEPCO), największy japoński producent energii elektrycznej, zaproponował firmie Toshiba zaprojektowanie próbnego generatora odwracalnego, do zainstalowania w istniejącej elektrowni. Z punktu widzenia obecnych potrzeb było to bardzo odmienne zastosowanie. Miało to miejsce w czasach, kiedy udział energii odnawialnej w bilansie produkcji był znikomy. Co więcej, Japonia ma bardzo stabilny system energetyczny, zasilany w 80% przez elektrownie ciepłone i atomowe. Do dzisiejszego dnia kraj ten ma bardzo niską część mocy produkowanej przez źródła odnawialne.

Przewodnim motywem TEPCO były wówczas korzyści ekonomiczne wynikające z regulowania częstotliwości sieci. W czasie niskiego zapotrzebowania na energię, kiedy znaczny udział w bilansie mocy mają elektrownie pompowo-szczytowe, regulowanie mocy odbywać się musiało przez regulację turbin ciepłych albo uruchomienie pompoturbin w ruchu turbinowym, podczas gdy inne turbozespoły odwracalne pracowały w ruchu pompowym. Żadna z tych możliwości nie jest ekonomicznie korzystna. Dobrym rozwiązaniem jest natomiast regulowany pobór mocy pompoturbin, osiągnięty przez regulację ich prędkości obrotowej.

Pierwszą instalacją tego typu jest Yagisawa, turbozespół z generatorem odwracalnym o mocy 85 MVA i prędkości obrotowej zmieniającej się od 130 do 156 obr/min. Jest to turbozespół zaprojektowany pierwotnie jako maszyna o stałej prędkości obrotowej. W ramach modernizacji, w roku 1990 Toshiba dostosowała go do zmiennej prędkości obrotowej. Przedsięwzięcie to okazało się sukcesem i w ślad za Yagisawa zainstalowano podobne urządzenia w wielu innych japońskich elektrowniach pompowo-szczytowych. Ponieważ uważano, że jeden turbozespół o zmiennej prędkości obrotowej w elektrowni pompowo-szczytowej wystarczy do zadanego celu, pozostałe turbozespoły w nowych elektrowniach miały stałą prędkość. Przykładem jest elektrownia pompowo-szczytowa Okukiyotsu, gdzie tylko jeden z sześciu turbozespołów ma regulowaną prędkość obrotową.

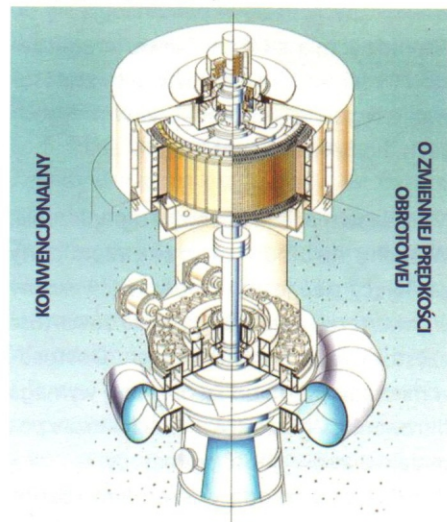
Odmiennea sytuacja ma miejsce na japońskiej wyspie Okinawa. Różnicowanie źródeł energii i odbiorców jest tam znacznie większe niż na dużych wyspach Japonii. Ażeby zapobiec nadmiernym wahaniom częstotliwości, w roku 1996 zainstalowano tam w miejscowości Chujowan generator odwracalny o regulowanej prędkości obrotowej. Zamiast pompoturbin, wyposażony jest w koło zamachowe. Producentem tego urządzenia jest Toshiba i otrzymało ono nazwę ROTES (Rotary Energy Storage System). Jest w stanie zgromadzić energię 200 MJ, co oznacza możliwość pobierania lub oddawania mocy 20 MW w ciągu 10 sekund. Prędkość obrotowa zmienia się od 510 do 690 obr./min, moc znamionowa wynosi 26.5 MVA.

Pierwsze pompoturbiny o regulowanej prędkości obrotowej zastosowano w Japonii na początku lat 90. XX w.

Celem ROTES jest szybka reakcja na zmiany obciążenia sieci energetycznej. W przypadkach wzrostu zapotrzebowania na energię, wyzwala on energię kinetyczną poprzez zmniejszenie prędkości obrotowej. Odwrotny proces zachodzi, kiedy zaistnieje nadmiar energii.

Prototyp ROTES znakomicie zdał egzamin w regulacji sieci i w ślad za nim poszła budowa na Okinawie małej elektrowni pompowo-szczytowej Yanbaru, z jednym turbozespołem odwracalnym o zmiennej

Porównanie generatora turboszespołu odwracalnego o stałej i zmiennej prędkości obrotowej ze wzbudzeniem prądem przemiennym



Copyright Toshiba Corp.

prędkości i mocy 31.8 MW. Producentem pompoturbiny jest Hitachi, zaś generatora odwracalnego Toshiba. Zarówno Chujowan jak i Yanbaru, znakomicie wypełniły swoją rolę. Stały się one początkiem nowego trendu instalowania urządzeń do szybkiej regulacji mocy poprzez wykorzystanie energii kinetycznej wirujących mas. Ten model dominuje obecnie w zastosowaniach europejskich.

POMPOTURBINY I SYSTEMY ELEKTRYCZNE

Pompoturbiny zmiennej prędkości obrotowej są praktycznie takie same jak te o stałej prędkości. Wymagają jednak głębszego posadowienia, ażeby uniknąć nadmiernej kawitacji powodowanej szerszym zakresem ruchu pompowego.

Strona elektryczna turboszespołów o regulowanej prędkości jest znacznie bardziej złożona. Główną jej częścią jest elektroniczny konwerter częstotliwości, przetwarzający prąd przemienny o częstotliwości sieci na prąd odpowiedni do zasilania generatora. Dominują w chwili obecnej dwa różne rozwiązania techniczne o zmiennej prędkości obrotowej.

MASZYNA SYNCHRONICZNA ZASILANA KONWERTEREM

Rozwiązanie to polega na użyciu konwertera częstotliwości do połączenia maszyny elektrycznej z siecią. Tak więc cały prąd zasilający stojan generatora przechodzi przez ten konwerter. Oznacza to, że pole magnetyczne stojana wiruje z zadaną prędkością, praktycznie od zera do częstotliwości synchronicznej maszyny (albo i wyższej,

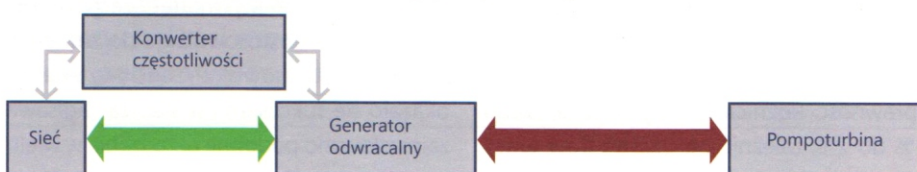
jeżeli tego trzeba). W rezultacie pozwala to na użycie konwencjonalnych maszyn elektrycznych, które w pełni nadają się do współdziałania z takim konwerterem częstotliwości. Znacznie upraszcza to zastosowanie regulowanej prędkości w przypadkach modernizacji urządzeń.

Metoda ta ma jednak pewne ograniczenia. W ruchu turbinowym prąd przemienny zasilający sieć jest w całości wytwarzany w inwerterze. Cechuje go duża zawartość częstotliwości harmonicznych. Dostosowanie tego prądu do jakości sieci wymaga filtrowania. Wysoki koszt takich filtrów pomniejsza atrakcyjność tej metody. Główną przeszkodą w szerokim rozpowszechnieniu się tej metody jest koszt. Ponieważ moc konwertera częstotliwości musi być bliska mocy generatora, wymaga to urządzeń elektronicznych o dużej mocy. Do niedawna więc stosowano ją tylko w małych instalacjach. Przykładem jest tu 12 pompo-

Schemat blokowy turbozespołu z maszyną synchroniczną zasilaną konwerterem



Schemat blokowy turbozespołu ze wzbudzeniem prądem przemiennym



turbin Diamond Valley (California) o mocy 4.5 MW. Ponieważ koszt urządzeń elektronicznych dużych napięć wciąż się zmniejsza, oznacza to, że zastosowanie tej metody do większych mocy staje się coraz bardziej atrakcyjne. Tak więc w roku 2013 uruchomiono turbozespół odwracalny o mocy 100 MVA, w elektrowni Grimsel 2 w Szwajcarii.

WZBUDZENIE PRĄDEM PRZEMIENNYM

Metodą regulacji prędkości obrotowej stosowaną w chwili obecnej do turbozespołów dużej mocy jest użycie wzbudzenia prądem przemiennym. W ten sposób moc elektronicznego konwertera częstotliwości odpowiada jedynie mocy potrzebnej do wzbudzenia, nie całego turbozespołu.

Zasadę działania tej metody określa proste równanie:

$$N_s = N_1 + N_2$$

gdzie: N_s oznacza częstotliwość sieci, N_1 – częstotliwość prądu wzbudzenia, N_2 – prędkość obrotową wirnika.

Tak więc pole magnetyczne stojana generatora wiruje z prędkością sieci, podczas gdy wzbudzenie o zmiennej częstotliwości pozwala na to, ażeby suma prędkości obrotowej wirnika i prędkości wirowania pola magnetycznego w wirniku równa była częstotliwości sieci. Pozwala to na znaczne ograniczenie wymaganej mocy (a więc i kosztu) konwertera częstotliwości. Wymaga to także specjalnej konstrukcji wirników generatorów.

GENERATORY ODWRACALNE O WZBUDZENIU PRĄDEM PRZEMIENNYM

Wirnik generatora o zmiennej częstotliwości obrotowej ma specjalną konstrukcję, przypominającą 3-fazowe stojany generatorów. Ponieważ uzwojenia wirnika są dłuższe niż w konwencjonalnych generatorach o stałej prędkości, generatory tego typu są

wyższe. Komplikuje to adaptację tej techniki w ramach modernizacji.

Ważną cechą decydującą o jakości wirników tego typu jest metoda zapobiegania odkształceniom uzwojeń pod wpływem siły odśrodkowej. Każdy z producentów tego sprzętu oferuje własne metody konstrukcyjne. Polegają one na użyciu taśm, pierścieni albo specjalnych śrub kotwicznych. Przy doborze konkretnych rozwiązań, ważne jest, ażeby pamiętać nie tylko o stabilności, ale także o jakości chłodzenia. Tak więc metody umożliwiające w miarę swobodny przepływ powietrza mają wyższość nad wszelkiego rodzaju pierścieniami mocującymi, ograniczającymi chłodzenie uzwojeń.

Z rozmów autora z firmami produkującymi sprzęt, a także z wyspecjalizowanymi konsultantami wynika, że 600 obr./min jest górną granicą prędkości obrotowej dla takich wirników. Największe obecnie generatory odwracalne tego typu to Kazunogawa, Japonia (Toshiba, moc znamionowa 475 MVA, konwerter 34 MVA, 3.9 kV).

KONWERTERY CZĘSTOTLIWOŚCI

W powszechnym użyciu są dwie metody wytwarzania prądu o zmiennej częstotliwości. Jedną z nich jest inwerter-konwerter, drugą cyklokonwerter. W przypadku inwertera-konwertera, prąd przemienny o częstotliwości sieci przetwarzany jest w konwerterze w prąd stały, a następnie w inwerterze w prąd przemienny o częstotliwości potrzebnej do zasilania maszyny lub wzbudzenia. Zaletami inwerterów-konwerterów są:

- stosunkowo niewielkie rozmiary, a więc i przestrzeń wymagana do instalacji systemów elektronicznych
- mała zawartość częstotliwości harmonicznych
- brak wymagania mocy reaktywnej.

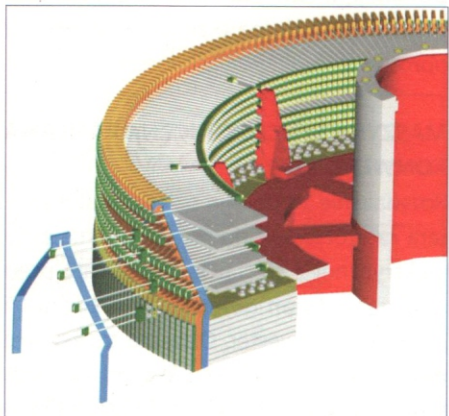
Zasada działania cyklokonwertera polega na syntetyzowaniu sinusoidy o zadanej

Wirnik generatora odwracalnego ze wzbudzeniem prądem przemiennym



Copyright Toshiba Corp.

Zamocowanie uzwojeń wirnika – metoda Toshiba



Copyright Toshiba Corp.

częstotliwości z prądu przemiennego sieci bez użycia pośredniego stopnia z prądem stałym. Zaletami tego cyklokonwertera są:

- niższe straty energii niż w konwerterze-inwerterze,
- wyższe napięcie pracy.

Dobór odpowiedniego systemu zależy od cech zastosowania.

Będąc urządzeniami na prąd przemienny, konwertery częstotliwości nie mogą wytwarzać prądu stałego. Minimalna częstotliwość prądu wzbudzenia wynosi zwykle 0.25 Hz. Oznacza to, że w przypadku użycia do wzbudzenia, nie jest możliwa praca pompoturbiny przy synchronicznej prędkości wirnika. Nie jest to jednak poważnym ograniczeniem, gdyż pozostałe pasmo zmiennej prędkości obrotowej jest wystarczająco szerokie, aby zapewnić potrzebną elastyczność. Częstotliwość maksymalna zależy od wielu czynników, takich jak zakres parametrów pompowania, moc systemu, a także względy ekonomiczne.

REGULACJA PARAMETRÓW PRACY

Regulacja warunków pracy turbosespołu odbywa się przy użyciu dwóch równoległych metod, elektrycznej i mechanicznej. Specjalne systemy regulacyjne dobierają odpowiednią kombinację parametrów. Zapewnia to szybkie dostosowanie pracy maszyny do potrzeb sieci, a także optymalne warunki funkcjonowania pompoturbiny.

Strona mechaniczna nie różni się od tego, co spotyka się w konwencjonalnych pompoturbinach. Regulację mocy turbinowej zapewniają łopatki kierownicze. Ponieważ warunki przepływowe sprawiają, że podczas optymalnej pracy w ruchu turbiny prędkość obrotowa była niższa niż synchroniczna, regulowana prędkość ob-

rotowa w pełni na to pozwala. Wynikiem jest zwiększenie sprawności i rozszerzenie zakresu produkowanej mocy. Zmiana prędkości używana jest głównie do regulacji częstotliwości.

W ruchu pompowym parametrem prowadzącym regulacji jest prędkość obrotowa.

W codziennej eksploatacji ani TEPCo, ani J-Power nie widzą żadnej różnicy w dyspozycyjności tych maszyn, w porównaniu z konwencjonalnymi turbosespołami odwracalnymi.

Pozycja łopatek kierowniczych dobierana jest z myślą o optymalnej sprawności, a także chęcią uniknięcia kawitacji czy niestabilnej pracy powodowanej wirującym oderwaniem na wlocie do wirnika.

Po stronie elektrycznej, używa się regulacji wektorowej. W przeciwieństwie do tradycyjnej metody skalarowej, gdzie wartość i kierunek prądu magnetyzującego są ze sobą związane, kontrola wektorowa pozwala na ich rozdzielenie. Oparte na mikroprocesorach układy elektroniczne pozwalają na szybkie obliczanie parametrów pracy, zapewniając tym samym odpowiednio szybką reakcję na zmianę zapotrzebowania mocy. Pozwala to na rozdzielenie regulacji mocy aktywnej i reaktywnej i ich zmianę w sposób praktycznie natychmiastowy.

DOŚWIADCZENIA UŻYTKOWNIKÓW

Pierwsze turbosespoły o regulowanej prędkości obrotowej pracują ponad 20 lat. W opinii ich właścicieli (TEPCo – Tokyo Electric Power Company, J-Power), jest to dojrzała technologia, nieprzedstawiająca szczególnych trudności technicznych.

Porównując z konwencjonalnymi, urządzenia o regulowanej prędkości mają nieco większe zapotrzebowanie na obsługę. Więcej jest bowiem części wymagających okresowej wymiany (szczotki komutatorów, kondensatory, itd., wymagające wymiany co 5-8 lat). Nie jest to jednak duża różnica i efektywny koszt eksploatacji jest bardzo podobny do rozwiązań konwencjonalnych. Zwiększony jest też czas potrzebny do rozruchu, albowiem rozbudowane systemy elektroniczne wymagają dodatkowej uwagi. W codziennej eksploatacji ani TEPCo, ani J-Power nie widzą żadnej różnicy w dyspozycyjności tych maszyn, w porównaniu z konwencjonalnymi turbosespołami odwracalnymi.

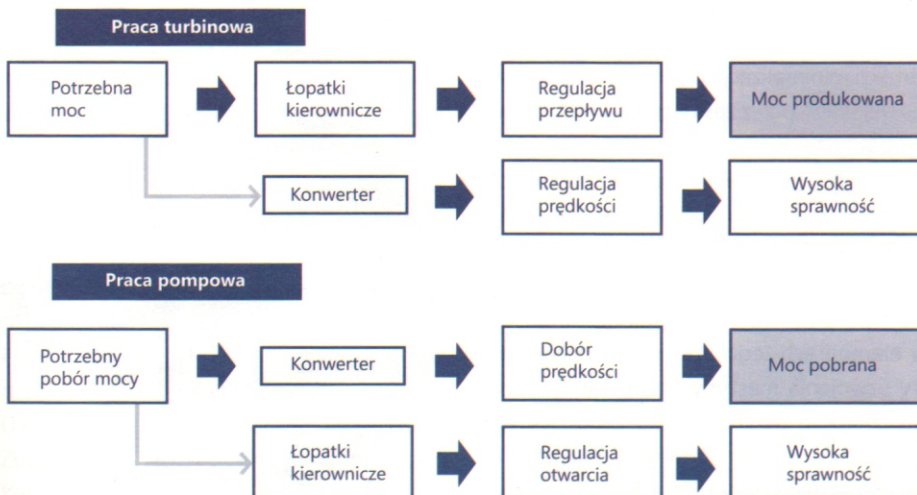
KOSZT

Koszt urządzeń elektronicznych jest największą przeszkodą w rozpowszechnieniu regulowanej prędkości obrotowej. O ile tradycyjne turbosespoły składają się z dwóch części o porównywalnej cenie (pompoturbina i generator odwracalny), w maszynach o regulowanej prędkości dochodzi trzeci element o podobnym koszcie – konwerter częstotliwości. Koszt konwertera zależy od jego mocy.

Tak więc urządzenia z maszyną synchroniczną zasilaną konwerterem są droższe niż ze wzbudzeniem prądem przemiennym o tej samej mocy. Nie jest to zależność proporcjonalna, gdyż te ostatnie wymagają specjalnego wirnika.

Pod względem kosztów eksploatacji, nie różnią się one od konwencjonalnych turbosespołów o stałej prędkości.

Schemat blokowy regulacji turbosespołu odwracalnego o zmiennej prędkości obrotowej



Juliusz Kirejczyk
Niezależny ekspert

Literatura

1. Toshiba Pumped Storage Technology; HydroVision 2008 Seminar, Sacramento, USA, 2008
2. Technical Trends and Development of Pumped Storage and Variable Speed Systems; HydroVision 2010 Seminar, Charlotte, USA, 2010

Fotografie i grafiki pochodzą z materiałów seminaryjnych **Toshiba Corporation**.