

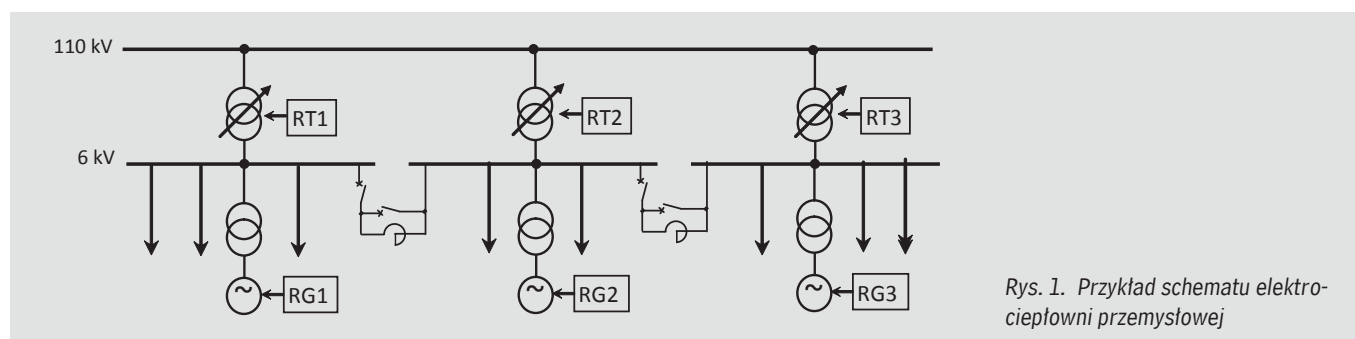
KOORDYNACJA UKŁADÓW REGULACJI GENERATORÓW I TRANSFORMATORÓW ELEKTROCIEPŁOWNI PRZEMYSŁOWEJ

prof. dr hab. inż. Zbigniew Szczerba / Politechnika Gdańska

1. WSTĘP

Wszystkie krajowe elektrociepłownie współpracują z krajowym systemem elektroenergetycznym, najczęściej są przyłączone do sieci 110 kV. Bloki generator – transformator elektrociepłowni zawodowych są przyłączone do szyn zbiorczych 110 kV, gdyż moc potrzeb własnych jest niewielka w porównaniu z mocą oddawaną do systemu. Moc pobierana do celów technologicznych z elektrociepłowni przemysłowej jest porównywalna z mocą generowaną. Generatory elektrociepłowni przemysłowych (zwykle w liczbie kilku) pracują równolegle, przyłączone do szyn zbiorczych 6 kV. Szyny zbiorcze 6 kV są połączone ze stacją 110 kV za pomocą co najmniej dwóch (zwykle kilku) transformatorów 110/6 kV. Niekiedy są to transformatory trójzwojeniowe w celu ograniczenia prądów zwarciovych po stronie 6 kV.

Przykładowy schemat elektrociepłowni przemysłowej pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Przykład schematu elektrociepłowni przemysłowej

Zgodnie z wymaganiami operatorów sieci, generatory i transformatory są wyposażone w układy regulacji. Doświadczenia zdobyte przez autora w kilku zakładach przemysłowych upoważniają do stwierdzenia, że układy regulacji generatorów są często nietrafnie nastawiane, a algorytmy działania regulatorów transformatorów 110/6 kV są nieprawidłowe.

W artykule podano propozycję koordynacji algorytmów działania układów regulacji.

2. UKŁADY REGULACJI GENERATORÓW

Wszystkie generatory wyposażone są na ogół w układy regulacji napięcia z ogranicznikami prądów oraz kąta mocy. Wszystkie układy regulacji mają układ kompensacji prądowej, niekiedy bardzo uproszczony (zależnie od dostawcy regulatora). W tab. 1 pokazano przykładowo dane regulatorów jednej z elektrociepłowni przemysłowych.

Streszczenie

Generatory elektrociepłowni przemysłowych (zwykle w liczbie kilku) pracują równolegle, przyłączone do szyn zbiorczych 6 kV. Szyny zbiorcze 6 kV są połączone ze stacją 110 kV za pomocą co najmniej dwóch (zwykle kilku) transformatorów 110/6 kV.

Układy regulacji generatorów są często nietrafnie nastawiane, a algorytmy działania regulatorów transfor-

matorów 110/6 kV są nieprawidłowe, uniemożliwiając współpracę układów regulacji elektrociepłowni.

W artykule podano propozycję koordynacji algorytmów działania układów regulacji.

Tab. 1. Układy regulacji generatorów

Lp.	Symbol	S_n	P_n	RN-rodzaj	LPS	LPW	LKM	PSS	Z_k	X_k	R_k
1	TG1	38,8	33	Cyfrowy	TAK	TAK	TAK	TAK	$R_k + jX_k$	TAK	TAK
2	TG2	56,7	51	Cyfrowy	NIE	TAK	TAK	NIE		TAK	NIE
3	TG3	40,0	32	Cyfrowy	NIE	TAK	TAK	NIE		TAK	NIE

S_n, P_n – znamionowa moc pozorna i czynna

RN – regulator generatora

LPS, LPW, LKM – ograniczniki prądu stojana, wirnika oraz kąta mocy

PSS – stabilizator systemowy

Z_k – impedancja kompensacji prądowej $Z_k = R_k + jX_k$

Układ kompensacji prądowej uzależnia wartość utrzymywanego napięcia od wartości obciążenia (głównie mocą bierną) i umożliwia stabilny rozdział mocy biernej pomiędzy współpracujące generatory, nawet w przypadku współpracy na połączone bezpośrednio (bez dławików) sekcje szyn zbiorczych. Jak pokazano w tab. 1, TG1 – ma pełny układ kompensacji prądowej, TG2 i TG4 mają tylko uzależnienie od mocy biernej (część X_k). TG1 ma wszystkie ograniczniki. TG2 i TG4 nie mają ograniczników prądu stojana.

Aktualne nastawienia ograniczników kąta mocy (poboru mocy biernej): $Q \geq 0$ wszystkich generatorów są nieprawidłowe, gdyż nie wykorzystują możliwości poboru mocy biernej przez generatory.

Nastawienia kompensacji prądowej są wzajemnie nieskoordynowane, co wynika z działania różnych ekip uruchamiających generatory w odstępach kilkuletnich. Podobny stan stwierdzono w wielu elektrociepłowniach przemysłowych.

Aktualne wykorzystanie układów regulacji

Personel nastawni, korygując zadajnikami napięcia wartości zadane napięcia generatorów, ma możliwość sterowania prawidłowym – w przybliżeniu proporcjonalnym do znamionowej mocy pozornej – rozdziałem mocy biernej. Przy korygującej współpracy personelu nastawni układy regulacji spełniają zadania:

- utrzymania zadanej, ustalonej tradycyjnie, wartości napięcia na szynach 6 kV
- zapewnienia w przybliżeniu prawidłowego rozdziału mocy biernej pomiędzy współpracujące generatory.

Dla prawidłowego spełniania drugiego zadania, jednak bez ciągłej interwencji obsługi nastawni, niezbędne jest jednakowe – w jednostkach względnych – nastawienie kompensacji prądowej regulatorów wszystkich generatorów.

Prawidłowe charakterystyki $Q-U$ układów regulacji generatorów zapewniające proporcjonalny lub zadany rozdział mocy biernej pomiędzy generatory

Współczesne regulatory generatorów – w zakresie zadania regulacji napięcia – mają charakterystyki $U = f(Q)$:

- Bez kompensacji prądowej $U_g \approx U_{gz}$ z bardzo niewielkim nachyleniem, wynikającym ze skończonej wartości wzmocnienia w pętli otwartej obwodu regulacji napięcia.
- Z kompensacją prądową wprowadzającą wirtualną impedancję zastępczą¹ generatora z regulatorem.

Jeżeli generatory nie pracują równolegle przyłączone do tego samego systemu szyn albo ich szyny zbiorcze są zawsze rozdzielone dławikiem, to mogą pracować przy kompensacji prądowej nastawionej na 0 (zero).

Jeżeli generatory pracują równolegle przyłączone do tego samego systemu szyn albo ich szyny zbiorcze nie są zawsze rozdzielone dławikiem, to mogą być zastosowane dwa rozwiązania:

1. Przy założeniu, że dokładność regulatorów cyfrowych jest bardzo wysoka, a ww. nachylenie charakterystyki bez kompensacji prądowej jest wystarczające, należy nastawić kompensację prądową na 0 (zero) i obserwować rozdział mocy biernej pomiędzy generatory bez udziału obsługi nastawni. Jeżeli,

1 Niektórzy dostawcy regulatorów oferują tylko uproszczoną kompensację prądową, wprowadzającą jedynie wirtualną reaktancję.



przy zmianach obciążenia, rozdział mocy biernej jest w przybliżeniu proporcjonalny do mocy pozornej generatorów, należy przyjąć rozwiązanie 1. Jeżeli nie – należy przyjąć rozwiązanie 2.

2. Nastawić kompensację prądową, np. na wartość $X_k = 0,02$ (2%) i obserwować rozdział mocy biernej pomiędzy generatory bez udziału obsługi nastawni. Jeżeli, przy zmianach obciążenia, rozdział mocy biernej jest w przybliżeniu proporcjonalny do mocy pozornej generatorów, należy przyjąć to rozwiązanie. Pomimo dużej dokładności regulatorów cyfrowych uchyby niesystematyczne przekładników napięciowych mogą powodować konieczność zastosowania tego rozwiązania.

Z powodu braku lub niejasności informacji o wartości rzeczywistego wzmocnienia w pętli otwartej układu regulacji, konieczne jest eksperymentalne postępowanie wg punktu 1 lub 2.

W mało prawdopodobnym przypadku, jeżeli przy wartości $X_k = 0,02$ rozdział mocy biernej nie jest w przybliżeniu proporcjonalny do mocy pozornej generatorów, należy zwiększyć wartość X_k do $X_k = 0,03$.

Podany wyżej sposób nastawienia regulatorów generatorów powinien zapewnić utrzymanie napięcia na szynach zbiorczych z dużą dokładnością bez ingerencji obsługi i regulatorów transformatorów.

3. UKŁADY REGULACJI TRANSFORMATORÓW

Stan obecny

Zwykle wszystkie transformatory są wyposażone w regulatory napięcia sterujące przełącznikami zaczełów.

Stosowane są regulatory różnych producentów, jednak z zasady taki regulator, zgodnie z dokumentacją jednego z producentów, „przeznaczony jest do automatycznej regulacji napięcia strony niższej lub numeru zaczełu (przekładni) transformatora”.

Regulatory tego typu są przeznaczone do transformatorów 110/15 kV, usytuowanych w stacjach zasilających sieć rozdzielczą 15 kV, tzw. GPZ. Regulatory nie mają elementów zapewniających wzajemną koordynację działania przy pracy równoległej transformatorów. Algorytmy działania tych regulatorów uniemożliwiają współpracę z układami regulacji generatorów po stronie 6 kV.

W elektrociepłowniach przemysłowych takie regulatory transformatorów są zawsze wyłączone. Stan taki jest prawidłowy, gdyż – prawdopodobnie z powodu błędnej dokumentacji projektowej – zastosowano regulatory napięcia transformatorów o nieodpowiednich algorytmach działania. Zastosowano regulatory o algorytmach działania „regulacja napięcia”, odpowiednich np. dla transformatorów 110/15 kV, zasilających sieci rozdzielcze średniego napięcia. Prawdopodobnie projektant zaprojektował „transformator z regulatorem” bez analizy specyfiki trzech transformatorów sprzęgających sieć 6 kV elektrociepłowni z siecią 110 kV.

Aktualnie przełączniki zaczełów transformatorów w elektrociepłowniach przemysłowych są sterowane ręcznie przez personel nastawni, kontrolujący odpowiednią wymianę mocy biernej z siecią 110 kV i prawidłowy rozdział mocy biernej pomiędzy współpracującymi transformatorami.

Prawidłowe charakterystyki $Q-U$ układów regulacji transformatorów 110/6 kV, zapewniające proporcjonalny lub zadany rozdział mocy biernej pomiędzy transformatory i prawidłową współpracę z układami regulacji generatorów

Założenia

Regulatory transformatorów powinny sterować przełącznikami zaczełów wszystkich transformatorów 110/6 kV bez ciągłej ingerencji personelu nastawni. Algorytm działania powinien zapewniać:

- Prawidłową współpracę transformatorów z rozdziałem mocy biernej w przybliżeniu proporcjonalnym do mocy znamionowej odpowiednich uzwojeń transformatorów
- Utrzymanie wymiany mocy biernej z siecią 110 kV o średniej wartości minimalizującej opłaty taryfowe za wskazania liczników kvarh
- Nieprzekraczanie dopuszczalnej częstości przełączeń przełącznika zaczełów.

W stanach normalnych zadanie utrzymania zadanej wartości napięcia na szynach 6 kV realizują układy regulacji generatorów.

Charakterystyki regulatorów transformatorów

Regulatory transformatorów 110/6 kV powinny mieć charakterystyki zapewniające:

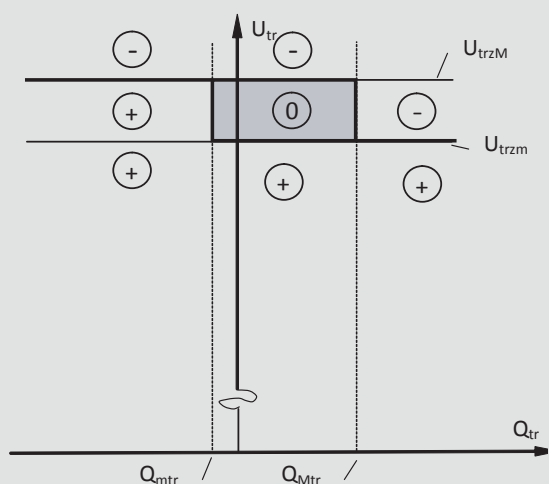
- Utrzymywanie zadanej wartości mocy biernej w przedziale Q_{trm}, Q_{trM} jeżeli napięcie po stronie 6 kV mieści się w przedziale U_{trm}, U_{trM}
- Przejęcie zadania utrzymywania napięcia po stronie 6 kV po wyczerpaniu się możliwości generatorów
- Założony, proporcjonalny do mocy znamionowej odpowiednich uzwojeń transformatorów, rozdział mocy biernej. Regulatory, oferowane przez lepszych dostawców, mają człony zapewniające taką współpracę. Proponowaną charakterystykę regulatorów transformatorów pokazano na rys. 2.

Strefy nieczułości i zwłoki czasowe

Strefy nieczułości, niezależne dla zmiennych U i Q , powinny zapewniać stabilną pracę układu regulacji na granicach obszaru „0” na rys. 2.

Zwłoki czasowe

- Dla zmiennej Q , powinny zapewniać nieprzekraczanie dopuszczalnej częstości działania przełączników zaczepów
- Dla zmiennej U , powinny zapewniać możliwie szybkie sterowanie przełączników zaczepów. Potrzeba działania, w celu utrzymania bezpiecznej dla zakładu wartości napięcia, występuje rzadko i szybkie przełączenia nie spowodują znaczącego wzrostu liczby przełączeń. Oczywisty jest priorytet zapewnienia odpowiedniej jakości energii elektrycznej, warunkującej ciągłość pracy zakładu.



Rys. 2. Charakterystyka transformatora z regulatorem

Q_{tr} – moc bierna transformatora, pobierana z sieci 110 kV

U_{tr} – napięcie transformatora

U_{trzm}, U_{trzM} – wartość zadana dolna i górna napięcia transformatora

Q_{Mtr} – ograniczenie poboru mocy biernej z sieci

Q_{mtr} – ograniczenie oddawania mocy biernej do sieci

■ – obszar nie działania regulatorów transformatorów

⊕ – podwyższanie napięcia po stronie 6 kV

⊖ – obniżanie napięcia po stronie 6 kV

○ – brak przełączeń przekładni.

4. WYTYCZNE ZMIAN NASTAWIEŃ ORAZ ZMIAN ALGORYTMÓW DZIAŁANIA UKŁADÓW REGULACJI GENERATORÓW ELEKTROCIĘPŁOWNI I TRANSFORMATORÓW 110/6 KV

Założenia

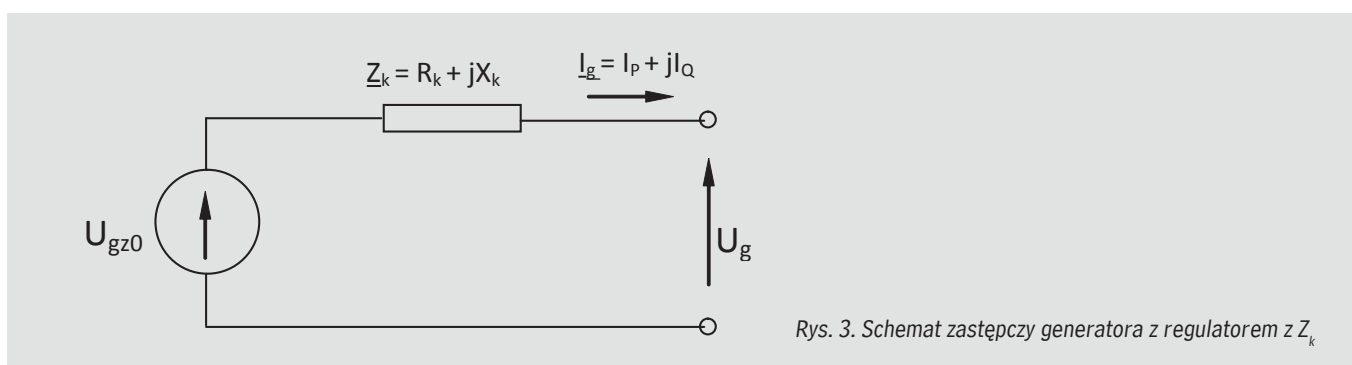
Układy regulacji generatorów elektrociepłowni i transformatorów 110/6 kV powinny, współpracując ze sobą, zapewniać:

- Utrzymanie wartości napięć w przedziale gwarantującym prawidłowe działanie wszystkich odbiorników związanych z procesem technologicznym zakładu

- Ograniczenie poboru mocy biernej z sieci 110 kV do wartości zapewniającej minimalizację kosztów zakupu energii elektrycznej z sieci 110 kV
- Możliwość wykorzystania całego obszaru dopuszczalnych stanów generatorów, z uwzględnieniem wszystkich ograniczeń (prąd stojana, prąd wirnika, kąt mocy, temperatura skrajnych pakietów stojana)
- Prawidłowy (w przybliżeniu proporcjonalny) rozdział mocy biernej pomiędzy współpracujące generatory
- Prawidłowy (w przybliżeniu proporcjonalny) rozdział mocy biernej pomiędzy współpracujące transformatory
- Nie dopuszczać do przekroczenia dopuszczalnej częstości działania przełączników transformatorów.

Charakterystyki generatorów

W nowoczesnych regulatorach generatorów istotnymi członami są:



Rys. 3. Schemat zastępczy generatora z regulatorem z Z_k

- Układ kompensacji prądowej, zapewniający w obszarze dopuszczalnych stanów schemat zastępczy w stanach ustalonych, pokazany na rys. 3.

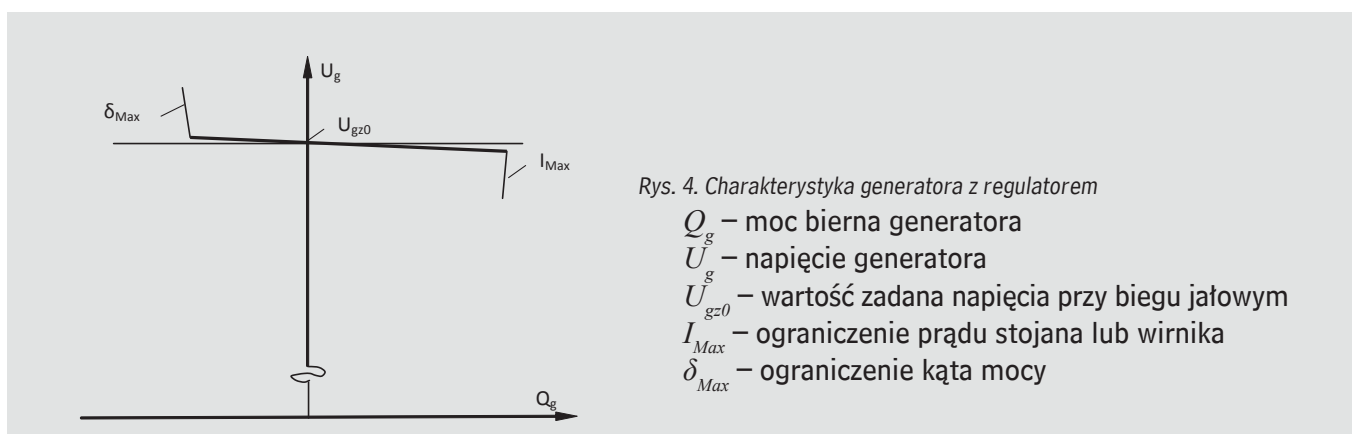
U_{gz0} – wartość zadana napięcia generatora przy biegu jałowym

U_g – napięcie generatora

$Z_k = R_k + jX_k$ – impedancja kompensacji prądowej.

Impedancja kompensacji prądowej $Z_k = R_k + jX_k$, o wartości nastawialnej w czterech ćwiartkach płaszczyzny zespolonej, pozwala na wprowadzenie do regulatora wirtualnego pomiaru napięcia i niemal dowolne kształtowanie schematu zastępczego (w stanie ustalonym) w schemacie podsystemu elektroenergetycznego elektrociepłowni.

- Ogranicznik prądu stojana, zapewniający spełnienie warunku nieprzekraczania dopuszczalnej wartości prądu stojana
- Ogranicznik prądu wirnika, zapewniający spełnienie warunku nieprzekraczania dopuszczalnej wartości prądu wirnika
- Ogranicznik kąta mocy (poboru mocy biernej), zapewniający stabilną współpracę z systemem i – niekiedy – nieprzegrzewanie skrajnych części rdzenia stojana.



Rys. 4. Charakterystyka generatora z regulatorem

Q_g – moc bierna generatora

U_g – napięcie generatora

U_{gz0} – wartość zadana napięcia przy biegu jałowym

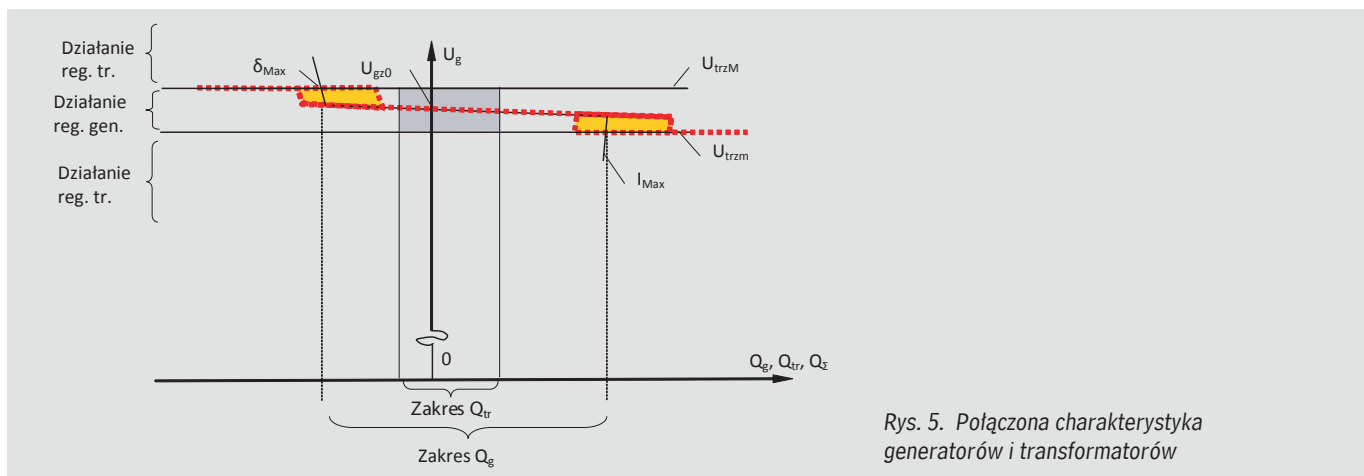
I_{Max} – ograniczenie prądu stojana lub wirnika

δ_{Max} – ograniczenie kąta mocy

Charakterystyka generatora – na płaszczyźnie Q, U – z układem regulacji zawierającym wyżej omówione człony, pokazuje zależność $U = f(Q)$ z ograniczeniami wprowadzonymi przez ograniczniki, rys. 4.

Połączenie charakterystyk generatorów i transformatorów

Po nałożeniu się charakterystyk układów regulacji generatorów i transformatorów, realizujących opisane wyżej algorytmy, otrzymuje się wypadkową charakterystykę, pokazaną na rys. 5.



Rys. 5. Połączona charakterystyka generatorów i transformatorów

- Q_g, Q_{tr}, Q_{Σ} – moc bierna generatorów, transformatorów, łączna
- U_g – napięcie na szynach 6 kV
- U_{gz0} – wartość zadana napięcia przy biegu jałowym
- I_{Max} – ograniczenie prądów stojana lub wirnika
- δ_{Max} – ograniczenie kątów mocy
- U_{trzM} – wartość zadana najwyższego napięcia transformatorów po stronie 6 kV
- U_{trzm} – wartość zadana najniższego napięcia transformatorów po stronie 6 kV
- – wypadkowa charakterystyka generatorów i transformatorów
- – rozmyta część wypadkowej charakterystyki
- – obszar niedziałania regulatorów transformatorów.

5. OPIS WSPÓLDZIAŁANIA UKŁADÓW REGULACJI GENERATORÓW I TRANSFORMATORÓW

Stany normalne

W stanach normalnych regulatory generatorów i transformatorów pracują autonomicznie.

Regulatory generatorów, z wartościami zadanymi napięcia korygowanymi sporadycznie przez personel nastawni, zapewniają prawidłowy rozdział mocy biernej pomiędzy współpracujące generatory.

Regulatory generatorów utrzymują zadaną wartość napięcia na szynach 6 kV (rys. 4 i 5) w pełnym przedziale generacji lub poboru mocy biernej od ograniczenia kątów mocy do ograniczenia prądów (wewnątrz obszaru dopuszczalnych stanów).

Regulatory transformatorów utrzymują pobór mocy biernej (rys. 2 i 5) w granicach zapewniających uniknięcie opłat za wskazania liczników kvarh (tzw. energię bierną).

Stany nienormalne

Po osiągnięciu granic obszaru dopuszczalnych stanów regulatory generatorów nie są w stanie utrzymać zadanej wartości napięcia na szynach 6 kV (rys. 3 i 5) z powodu działania ograniczników kątów mocy lub ograniczników prądów.

Po wyczerpaniu możliwości utrzymania zadanej wartości napięcia przez generatory utrzymanie zadanej wartości napięcia przejmują regulatory transformatorów (rys. 2 i 5).

Stany awaryjne

W stanach awaryjnych, takich jak zwarcia w sieci 110 kV i 6 kV, krótkotrwałe zapady napięcia itp., układy regulacji transformatorów nie powinny działać. Układy regulacji generatorów powinny reagować szybko, zgodnie z aktualnymi charakterystykami, w celu podtrzymania stabilności współpracy elektrociepłowni z systemem elektroenergetycznym i zapewnienia prawidłowego działania zabezpieczeń elektroenergetycznych.

6. PROPOZYCJA KONCEPCJI NADRZĘDNEGO UKŁADU KOORDYNUJĄCEGO WSPÓŁPRACĘ WSZYSTKICH REGULATORÓW GENERATORÓW ELEKTROCIEPŁOWNI I TRANSFORMATORÓW 110/6 kV

Zapotrzebowanie lokalne na moc bierną jest pokrywane z następujących źródeł:

- Generatory elektrociepłowni
- Sieć 110 kV (przez transformatory 110/15 kV)
- Baterie kondensatorów w sieci 6 kV.

Podany wyżej dobór charakterystyk i nastawień układów regulacji generatorów i transformatorów 110/6 kV zapewnia prawidłową wartość napięcia na szynach 6 kV i prawidłową wartość pobieranej mocy biernej z sieci 110 kV. Sterowanie baterii kondensatorów odbywa się ręcznie z nastawni elektrociepłowni.

Możliwe jest opracowanie algorytmu sterowania układem nadrzędnym, obejmującego wszystkie wymienione źródła, jednak algorytm ten powinien być oparty na analizie techniczno-ekonomicznej:

- Optymalnej wartości napięcia na szynach 6 kV, uwzględniającej spadki napięcia w relacji szyny 6 kV – odbiorniki
- Optymalnego wykorzystania baterii kondensatorów
- Optymalnego, a nie tylko dla uniknięcia opłat, wykorzystania wymiany mocy biernej z siecią 110 kV
- Właściwego doboru nastawień przekładni transformatorów 6/0,4 kV.

Wyżej wymieniony algorytm może być ujęty w instrukcji obsługi nastawni (do realizacji przez personel dyżurny) albo zaimplantowany w nadrzędnym układzie automatyki.

W kraju stosuje się takie układy w węzłach wytwórczych, skrót RGWW (Regulacja Grupowa Węzła Wytwórczego). Dostawcy krajowi oferują takie układy realizujące algorytmy wymagane przez zamawiających.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Regulatory generatorów

Na ogół obecne regulatory generatorów, opisane wyżej, nie wymagają wymiany. Przez odpowiednie nastawienia regulatory te będą realizowały algorytmy opisane wyżej i prawidłowo współpracowały z nowymi regulatorami transformatorów.

Regulatory transformatorów

Obecnie stosowane regulatory przeznaczone są „do automatycznej regulacji napięcia strony niższej lub numeru zaczepu (przekładni) transformatora”. Zwykle regulatory te nie mają elementów zapewniających wzajemną koordynację działania przy pracy równoległej transformatorów. Algorytmy działania tych regulatorów uniemożliwiają współpracę z układami regulacji generatorów.

Regulatory te powinny być zastąpione przez regulatory realizujące algorytm podany w artykule.

Regulatory transformatorów, oferowane obecnie na krajowym rynku, są przeznaczone tylko do regulacji napięcia. Żaden regulator nie realizuje postulowanego algorytmu.

Dostawcy krajowi powinni oferować regulatory realizujące postulowany algorytm regulacji mocy biernej – w określonym przedziale wartości napięcia 6 kV – i regulacji napięcia na granicach tego przedziału.

Nadrzędny układ regulacji

Decyzja o zastosowaniu nadrzędnego układu RGWW (Regulacja Grupowa Węzła Wytwórczego) w konkretnej elektrociepłowni powinna być podjęta po opracowaniu analizy techniczno-ekonomicznej, uwzględniającej korzyści z optymalizacji poziomów napięcia i gospodarki mocą bierną w całym zakładzie, łącznie z elektrociepłownią.

Dostawcy krajowi oferują takie układy realizujące algorytmy wymagane przez zamawiających.

BIBLIOGRAFIA

1. Prace Katedry Elektroenergetyki Politechniki Gdańskiej wykonane w ramach projektu badawczego „Bezpieczeństwo Elektroenergetyczne Kraju” 2009.
2. Hellmann W., Szczerba Z., Regulacja Częstotliwości i Napięcia w Systemie Elektroenergetycznym, WNT 1978.
3. Machowski J. i inni, Power System Dynamics – Stability and Control. J. Wiley 2008.
4. Szczerba Z. i inni, Poradnik Inżyniera Elektryka, rozdział 7, Systemy Elektroenergetyczne, WNT 2005.