

Politechnika Lubelska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

**Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń**

Laboratorium Sieci Elektroenergetycznych

Ćwiczenie nr 2

Badanie modelu transformatorowego układu regulacji napięcia

# **1 Ogólne uwagi dotyczące regulacji napięcia w systemie elektroenergetycznym**

Podstawowymi parametrami decydującymi o jakości energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom oraz o warunkach pracy systemu elektroenergetycznego są napięcie i częstotliwość.

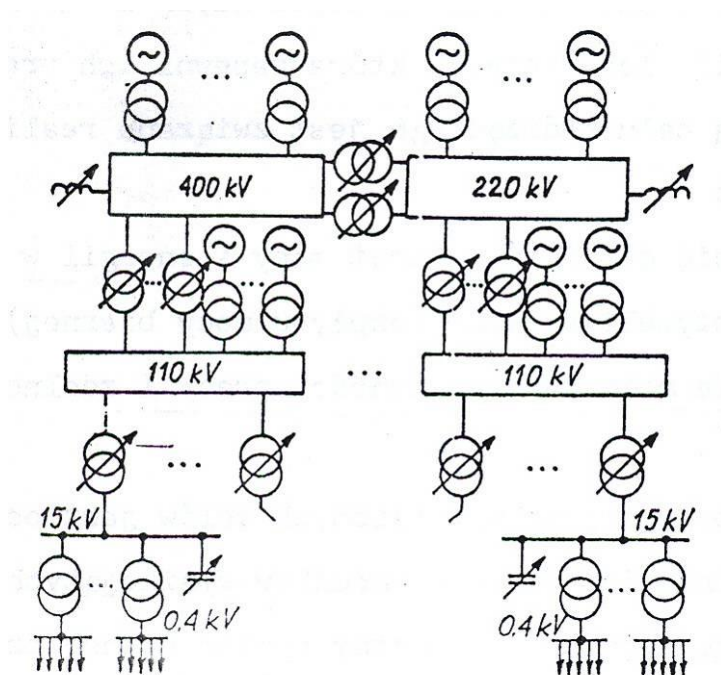
Działania zmierzające do utrzymania wartości napięcia na najkorzystniejszym poziomie nazywa się regulacją napięcia, podobnie jak działania prowadzące do utrzymywania właściwej częstotliwości – regulacją częstotliwości. W ramach niniejszego ćwiczenia przedstawiono podstawowe problemy regulacji tego pierwszego parametru. Nadrzędnym celem regulacji napięcia w systemie elektroenergetycznym jest utrzymanie takiej wartości napięcia na zaciskach odbiorników energii elektrycznej, która zapewni ich prawidłową pracę.

Z realizacją celu nadrzędnego jest związana realizacja celów dodatkowych:

- zredukowanie do minimum strat mocy i energii w sieci (co wiąże się ze zoptymalizowaniem rozptyłu mocy biernej),
- osiągnięcie maksymalnej pewności pracy i zdolności przesyłowej systemu.

Dążenie do osiągnięcia wymienionych celów jest oczywiście związane ze spełnieniem szeregu warunków wynikających z ograniczeń technicznych, mających konkretny wymiar ekonomiczny (np. przedwczesne zużycie podobciążeniowych przełączników zaczepów w transformatorach przy zbyt częstym działaniu).

W sieciach systemu elektroenergetycznego można wyróżnić 3 charakterystyczne grupy sieci zróżnicowane pod względem wysokości napięcia i rodzaju pracy, a także organizacji prowadzenia ruchu. Grupy te bywają nazywane warstwami napięciowymi. Do warstwy najwyższej zalicza się wielkie elektrownie oraz wiążące je sieci 220kV, 400kV i 750kV. Do drugiej należą sieci 110 kV wraz z zasilającymi je transformatorami. Grupę trzecią stanowią sieci średnich i niskich napięć. Sposoby regulacji napięcia w poszczególnych grupach różnią się od siebie, zaś wpływ regulacji w jednej grupie na warunki napięciowe w grupach pozostałych jest ograniczony. Wzajemne powiązanie elementów systemu oraz ich możliwości regulacyjne przedstawiono schematycznie na rys. 1.



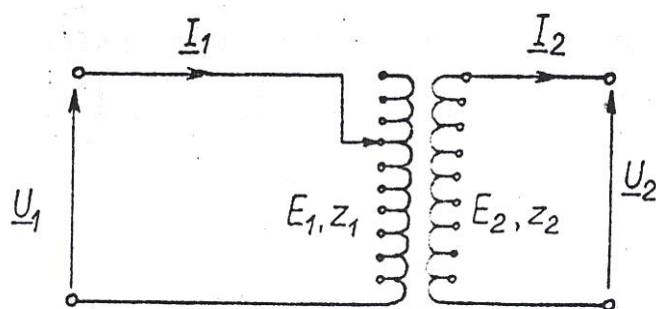
Rys. 1. Elementy systemu elektroenergetycznego służące do regulacji napięcia i mocy biernej

W różnych warstwach napięciowych niektóre z wymienionych powyżej celów regulacji mają wyraźnie większe znaczenie od pozostałych. Tak więc przy regulacji w sieciach średnich i niskich napięć podstawowym celem jest zapewnienie najkorzystniejszych poziomów napięć u odbiorców. W sieciach 110 kV warunek zapewnienia najkorzystniejszych napięć odbiorcom zatracą swą ostrość, gdyż wobec znacznego zakresu regulacji przekładni w transformatorach 110/SN warunek ten sprowadza się do utrzymywania napięć 110 kV w dość szerokich granicach. W zamian za to zyskują na znaczeniu inne cele t.j. ograniczenie strat mocy i energii oraz utrzymanie maksymalnej pewności ruchu. W warstwie napięć najwyższych najważniejsze cele regulacji napięcia to ograniczenie strat przy utrzymaniu maksymalnej zdolności przesyłowej. Regulacja napięcia w tej warstwie posiada charakter kompleksowy i obejmuje całą sieć krajową. Jest ona realizowana za pomocą regulatorów wzbudzenia generatorów wielkich elektrowni, autotransformatorów sprzęgłowych wieloczołonowych baterii kondensatorów (także dławików). Węższy zakres posiada regulacja napięcia w warstwie drugiej, ograniczona do obszaru równolegle współpracującej sieci 110 kV zasilanej z kilku sąsiednich stacji redukcyjnych. Najmniejszy zasięg ma regulacja napięcia w sieci średniego napięcia ograniczona do obszaru zasilanego z jednego tylko transformatora 110kV/SN. Jest to przypadek najliczniej reprezentowany, a równocześnie najprostszy, bo sprowadzający się do regulacji pojedynczego obiektu, tzn. transformatora z regulacją

przekładni pod obciążeniem. Ten właśnie przypadek jest przedmiotem badań przeprowadzonych w ramach niniejszego ćwiczenia.

## 2 Transformator jako urządzenie do regulacji napięcia

Transformator energetyczny o regulowanej przekładni jest elementem systemu umożliwiającym regulację napięcia i rozptyłu mocy biernej. Ogólne równania transformatora wyposażonego w przełącznik zaczepów wynikają z jednofazowego schematu zastępczego (rys.2).



Rys. 2. Schemat transformatora jednofazowego o zmiennej przekładni

$$\underline{E}_1 = \underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 \quad (2.1)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2$$

gdzie:  $\underline{Z}_1 = \underline{R}_1 + j\underline{X}_1$ ;  $\underline{Z}_2 = \underline{R}_2 + j\underline{X}_2$ ;

$R_1, R_2$  – rezystancje uzwojeń,

$X_1, X_2$  – reaktancje rozproszenia uzwojeń.

Uwzględniając, że  $R_1 \ll X_1, R_2 \ll X_2$  otrzymuje się:

$$E_1 = U_1 - I_{1q} X_1 \quad (2.2)$$

$$E_2 = U_2 + I_{2q} X_2$$

Równania (2.2) wraz z zależnościami

$$(2.3)$$

$$g = \frac{z_1}{z_2} = \frac{E_1}{E_2}$$

oraz

$$I_{1q} = \frac{1}{g} I_{2q} + I_{\mu}$$

pozwalają na dokonanie analizy pracy transformatora w powiązaniu z różnymi układami regulacji.

Regulację napięcia za pomocą transformatora przeprowadza się przez zmianę jego przekładni, zwiększając bądź zmniejszając liczbę czynnych zwojów w uzwojeniu pierwotnym lub

wtórnym. O uzyskanych efektach napięciowych takiej regulacji decyduje nie tylko dokonana zmiana przekładni transformatora, ale także warunki sieciowe w miejscu jego zainstalowania. Spowodowane regulacją zmiany prowadzą do ustalenia się takich poziomów napięcia na transformatorze, przy których następuje równowaga poboru i wytwarzania mocy biernej. Poniżej rozpatrzono 3 charakterystyczne przypadki usytuowania transformatora w sieci oraz związane z nimi efekty zmiany przekładni:

- a) transformator (a najczęściej autotransformator) jest usytuowany pomiędzy węzłami o określonych w sposób „sztywny” wartościach napięć  $U_{S1}$ ,  $U_{S2}$ ; pomiędzy aktualną wartością przekładni  $\mathcal{G}$  a mocą bierną odbieraną po stronie (2) zachodzi następujący związek:

(2.4)

$$Q_2 = \frac{U_{S1} \cdot U_{S2} \cdot \mathcal{G} - U_{S2} \cdot I_\mu \cdot \mathcal{G} \cdot X_1 - U_{S2}^2 \cdot \mathcal{G}^2}{\mathcal{G}^2 \cdot X_2 + X_1}$$

Widzimy, że wartość przekładni określa żądany przepływ mocy biernej od jednego węzła do drugiego.

- b) transformator sprzęga węzeł wytwórczy (szyny elektrowni) z węzłem o określonej wartości napięcia (szyny stacji przesyłowej); dzięki zmianom przekładni osiąga się żądany poziom napięcia w węźle wytwórczym, nawet wtedy, gdy możliwości wytwarzania mocy biernej w źródle są ograniczone.

Pomiędzy wielkościami zadanymi ( $U_{S2}$ ,  $Q_1$ ) a wielkością regulowaną ( $U_1$ ) oraz przekładnią  $\mathcal{G}$  zachodzi związek:

(2.2)

$$U_1^2 + U_1 \cdot (I_\mu \cdot X_2 \cdot \mathcal{G}^2 - U_{S2} \cdot \mathcal{G}) + Q_1 \cdot (\mathcal{G}^2 \cdot X_2 + X_1) = 0$$

- c) transformator zasila sieć otwartą /w szczególnym przypadku promieniową/; zmiany przekładni gwarantują odpowiedni poziom napięcia od strony tej sieci  $/U_2/$  przy odpowiadającym mu poziomie mocy biernej  $Q_2$ , tj.

(2.3)

$$U_2^2 + U_2 \cdot (I_\mu \cdot \frac{X_1}{\mathcal{G}} - \frac{U_{1S}}{\mathcal{G}}) + Q_2 (X_2 + \frac{X_1}{\mathcal{G}^2}) = 0$$

Na podstawie zależności /2.1/, /2.2/, /2.3/ stwierdzamy, że transformator wraz z odpowiednim układem sterowania zmianami przekładni może pełnić różne funkcje regulacyjne w zakresie poziomów napięcia i rozptywu mocy biernej.

### 3 Regulacja przekładni transformatora zasilającego sieć promieniową średniego napięcia

Na rys. 3 przedstawiono transformator wraz z układem regulacji zasilający sieć promieniową. Transformator jest obciążony mocą  $P_s$ ,  $Q_s$  w zależności od kształtu tzw. dobowych krzywych obciążenia, odpowiednio dla mocy czynnej i biernej. Sposób rozłożenia obciążenia wzdłuż linii możemy scharakteryzować wprowadzając rezystancję  $R_z$  i reaktancję  $X_z$  zdefiniowane w następujący sposób:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot P_i}{P_s}; X_z = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot Q_i}{Q_s} \quad (3.1)$$

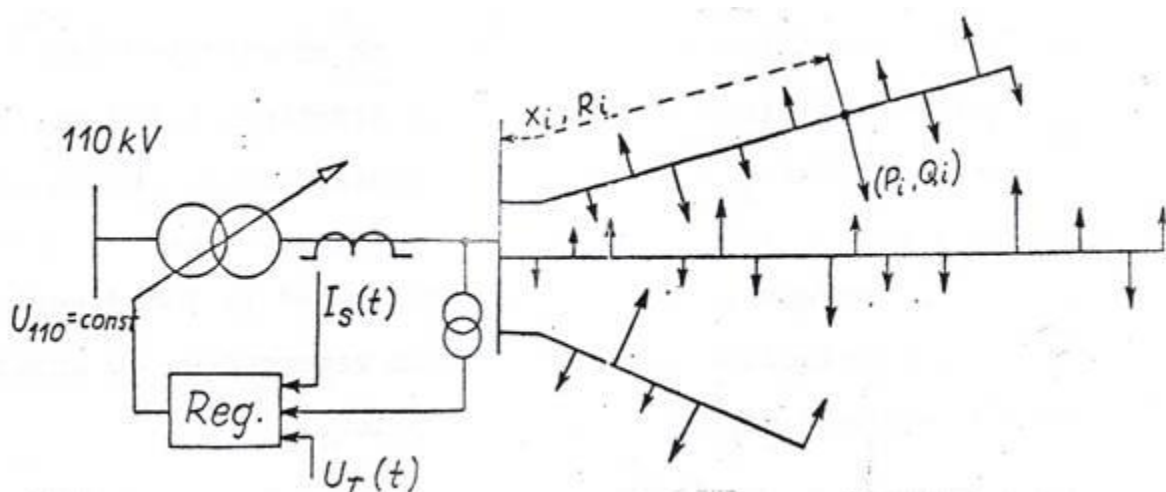
przy czym:

$P_i$  – moc czynna odbierana w punkcie  $i$ ,

$R_i$  – rezystancja pomiędzy transformatorem a  $i$ -tym punktem odbioru mocy czynnej,

$Q_i$ ,  $X_i$  – analogiczne wielkości dla mocy biernej i reaktancji.

Z uwagi na fakt, że wszystkie moce występujące w (3.1) są funkcjami czasu (podlegają zmianom dobowym) impedancja  $\underline{Z}_z = R_z + jX_z$  opisująca tzw. środek ciężkości obciążenia również nie posiada ustalonej wartości.



Rys. 3. Sieć promieniowa zasilana przez transformator z regulatorem napięcia

Napięcie w środku ciężkości obciążenia  $Z$  w układzie bez regulacji napięcia wynosi:

$$U_Z = U_{110} \cdot 9 - (R_Z \cdot I_S^C - X_Z \cdot I_S^b) \cdot \sqrt{3} \quad (3.2)$$

a w układzie z regulacją:

$$U_Z = U_T(t) - (R_Z \cdot I_S^C - X_Z \cdot I_S^b) \cdot \sqrt{3} \quad (3.3)$$

przy czym wartość  $U_T(t)$  wynika z zaprogramowanych zmian przekładni transformatora. Korzystne efekty regulacyjne uzyskuje się uzależniając wartość napięcia regulowanego od prądu transformatora. Dokonuje się tego przez tzw. kompensację prądową regulatora (szczegóły techniczne tego rozwiązania są w p.5) otrzymując:

$$U_Z = U_T(t) + [(R_k - R_Z) \cdot I_S^C + (X_k - X_Z) \cdot I_S^b] \cdot \sqrt{3} \quad (3.4)$$

przy czym  $R_k$ ,  $X_k$  są elementami układu kompensującego wbudowanego do regulatora. Widzimy, że gdyby znana była zależność  $R_Z(t)$ ,  $X_Z(t)$ , a elementy  $R_k$ ,  $X_k$  mogłyby być programowane tak, aby  $R_Z(t) = R_k$  i  $X_Z(t) = X_k$ , wtedy dobowy przebieg napięcia w środku ciężkości obciążenia byłby zgodny z programem  $U_T(t)$ . W praktyce

$$U_Z = U_T(t) + F(t) \quad (3.5)$$

gdzie  $F(t)$  jest złożoną funkcją zależną od wielu czynników, której wartość powinna być w procesie regulacji zminimalizowana. Optymalizacja nastawień  $R_k$ ,  $X_k$  jest osiągana poprzez eksperymentalne badania sieci terenowych zasilających charakterystyczne grupy odbiorców. Możliwość programowania przebiegu  $U_T(t)$  np. za pomocą telesterowania daje istotne możliwości oddziaływania na odbiorców poprzez regulację napięcia. Jednakże w praktyce krajowe wartości  $U_T$  oprogramowane są w sposób „sztywny” (2 lub 3 wartości w ciągu doby przełączane za pomocą układu zegarowego) co znacznie ogranicza możliwość uzyskiwania tych efektów.

## 4 Zasada działania i budowa transformatorowych regulatorów napięcia

Aczkolwiek szczegółowe rozwiązania techniczne poszczególnych typów regulatorów mogą być znacznie zróżnicowane, to jednak w każdym z nich można wyróżnić charakterystyczne elementy, które przedstawiono na rys. 4.

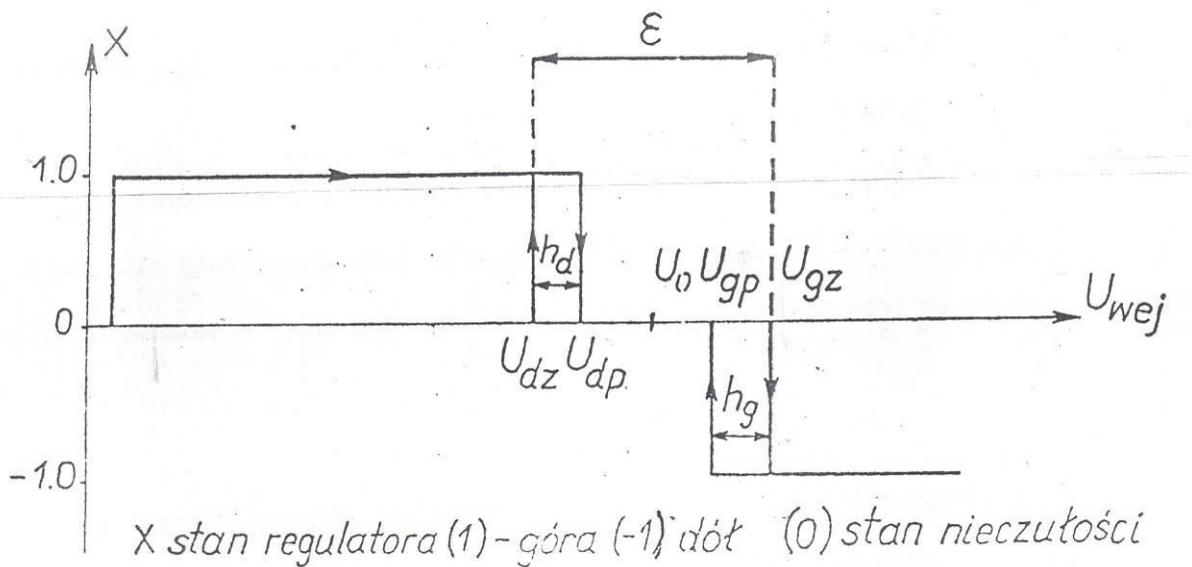
Układ pomiarowy dokonuje porównania wartości zadanej napięcia (nastawionej na regulatorze bądź wyprowadzonej przez urządzenie programujące) z wartością napięcia transformatora. W regulatorze RNTT-32 wykorzystywanym w ćwiczeniu układ ten zrealizowany jest w oparciu o wzmacniacze magnetyczne. Obecnie regulatory typu RNTT-32 są wypierane przez nową konstrukcję RNTH-3 opartą o technikę elektroniczną.

Przełączniki opóźniające powodują, że sygnał na zadziałanie podobciążeniowego przekładnika zaczepów podawany jest dopiero wtedy, gdy zmiana napięcia trwa istotnie długo. W badanym regulatorze regulowana zwłoka  $\Delta t = 20 \div 200 \text{ sek.}$  Powoduje ona, że średnia dobową liczba zadziałań przełącznika zaczepów nie przekroczy 30-60. Pozwala to na uniknięcie wysokiej awaryjności przełącznika zaczepów, pracującego w szczególnie ciężkich warunkach podobciążeniowych.

Przełącznik blokujący stosuje się po to, aby po wykonaniu pierwszego przełączenia zabezpieczyć się przed zrealizowaniem dalszych przełączeń, o ile nie będzie to konieczne. Również dzięki temu podnosi się trwałość układu przełączającego.







Rys. 5 Charakterystyka statyczna regulatora RNTT-32

Widoczne na rys.5 symbole mają następujące znaczenie:

$U_o$  – napięcie zadane,

$U_{dz}$  – dolne napięcie zadziałania,

$U_{dp}$  – dolne napięcie powrotu

$U_{gz}$  – górne napięcie zadziałania,

$U_{gp}$  – górne napięcie powrotu,

$h_d = h_g = h$  – histereza regulatora,

$$\varepsilon = U_{gz} - U_{dz}$$

Ostatnie dwie wielkości podaje się najczęściej w procentach odnosząc je do napięcia znamionowego regulatora  $U_{on} = 100V$ .

Ogólnie rzecz biorąc poprawna praca regulatora możliwa jest wtedy, gdy zachowane są dwa warunki:

- nie może nastąpić jednoczesne wysłanie przez regulator sygnału na podwyższenie i obniżenie napięcia,
- nie zachodzi przeregulowanie t.j. ciągłe przełączanie zaczipów transformatora w górę i w dół.

Spełnienie warunku pierwszego wymaga aby:

$$h < \varepsilon$$

który zapewnia najczęściej konstrukcja regulatora (dla RNTT-32  $\varepsilon = 2 - 8\%$   $h = 0,4\%$ ).

Spełnienie warunku drugiego jest uzależnione od procentowej wartości napięcia zaczeptu transformatora przeliczonej na stronę wtórną i odniesionej do  $U_{on}$  ( $\Delta U_{z\%}$ ) i wyraża się w postaci nierówności:

$$\varepsilon > \Delta U_{z\%} + h$$

Ponieważ w przypadku laboratoryjnego modelu układu transformatora przełącznik zaczepów, również ze spełnieniem drugiego warunku stabilnej regulacji napięcia nie ma problemu. Szczegółowe informacje dotyczące modeli matematycznych regulatorów, szczegółów rozwiązań technicznych zawiera praca [1] oraz fabryczne instrukcje producenta [2] (w kraju transformatorowe regulatory napięcia produkuje Zakład Remontowy Energetyki w Gdańsku).

## 5 Dobór parametrów układu kompensacji prądowej

W praktyce do regulatora doprowadzane jest napięcie międzyfazowe z jednego z przekładników pracujących w układzie V.

Międzyfazowe napięcie w środku ciężkości obciążenia wyznaczamy ze wzoru:

$$U_{STz} = U_{ST} - \Delta U_{ST} \quad (5.1)$$

Techniczne rozwiązanie układu kompensacji polega na doprowadzeniu do członu pomiarowego i porównanie z wartością zadaną (nastawnik członu pomiarowego jest wyskalowany w wartościach napięcia międzyfazowego) wielkości proporcjonalnej do  $U_{STz}$ , zgodnie z rys. 5a.

Ponieważ

$$U_0 = U_{st} - \Delta U_k \quad (5.2)$$

Zatem układ kompensujący powinien spełniać warunek:

$$\Delta \underline{U}_k \cdot \vartheta = \Delta U_{ST} \quad (5.3)$$

Uniezależnienie spełnienia warunku (5.3) od kąta fazowego obciążenia można osiągnąć jeśli

$$\Delta \underline{U}_k \cdot \vartheta_U = \Delta \underline{U}_{ST} \quad (5.4)$$

Z teorii sieci wynikają następujące zależności na straty napięcia:

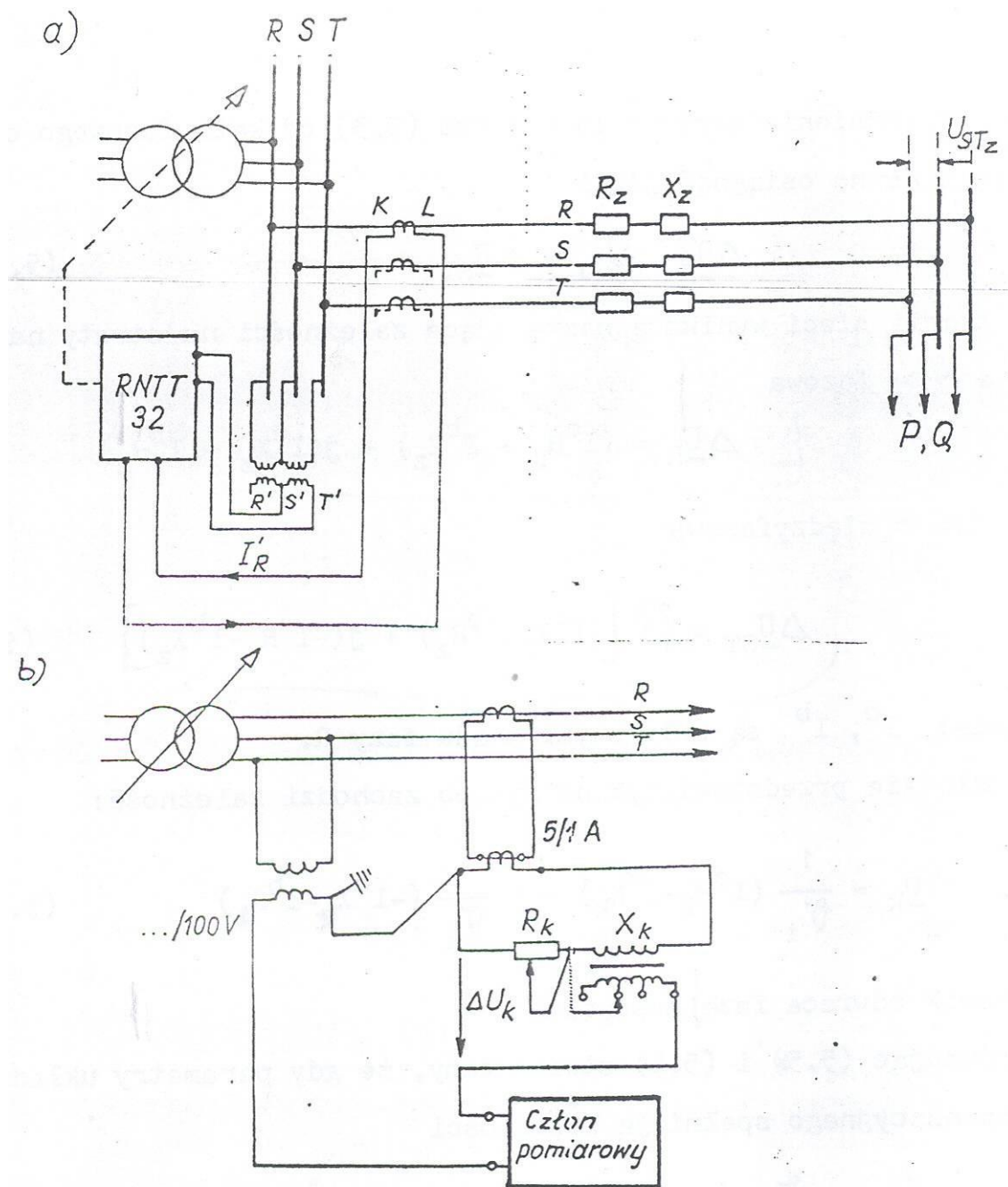
- strata fazowa

$$\Delta U_R = (I^c \cdot R_Z + I^b \cdot X_Z) + j(I^c \cdot X_Z + I^b \cdot R_Z) \quad (5.5a)$$

- strata międzyfazowa

$$\Delta U_{ST} = \sqrt{3} [(I^c \cdot X_Z + I^b \cdot R_Z) + j(-I^c \cdot R_Z - I^b \cdot X_Z)] \quad (5.5b)$$

gdzie:  $I^c$ ,  $I^b$  są składowymi prądu fazy R.



Rys. 6.a) Schemat połączenia regulatora napięcia z siecią za pośrednictwem układu przekładników, b) schemat układu kompensacji prądowej przekładnika RNTT

W układzie przedstawionym na rys. 6b zachodzi zależność:

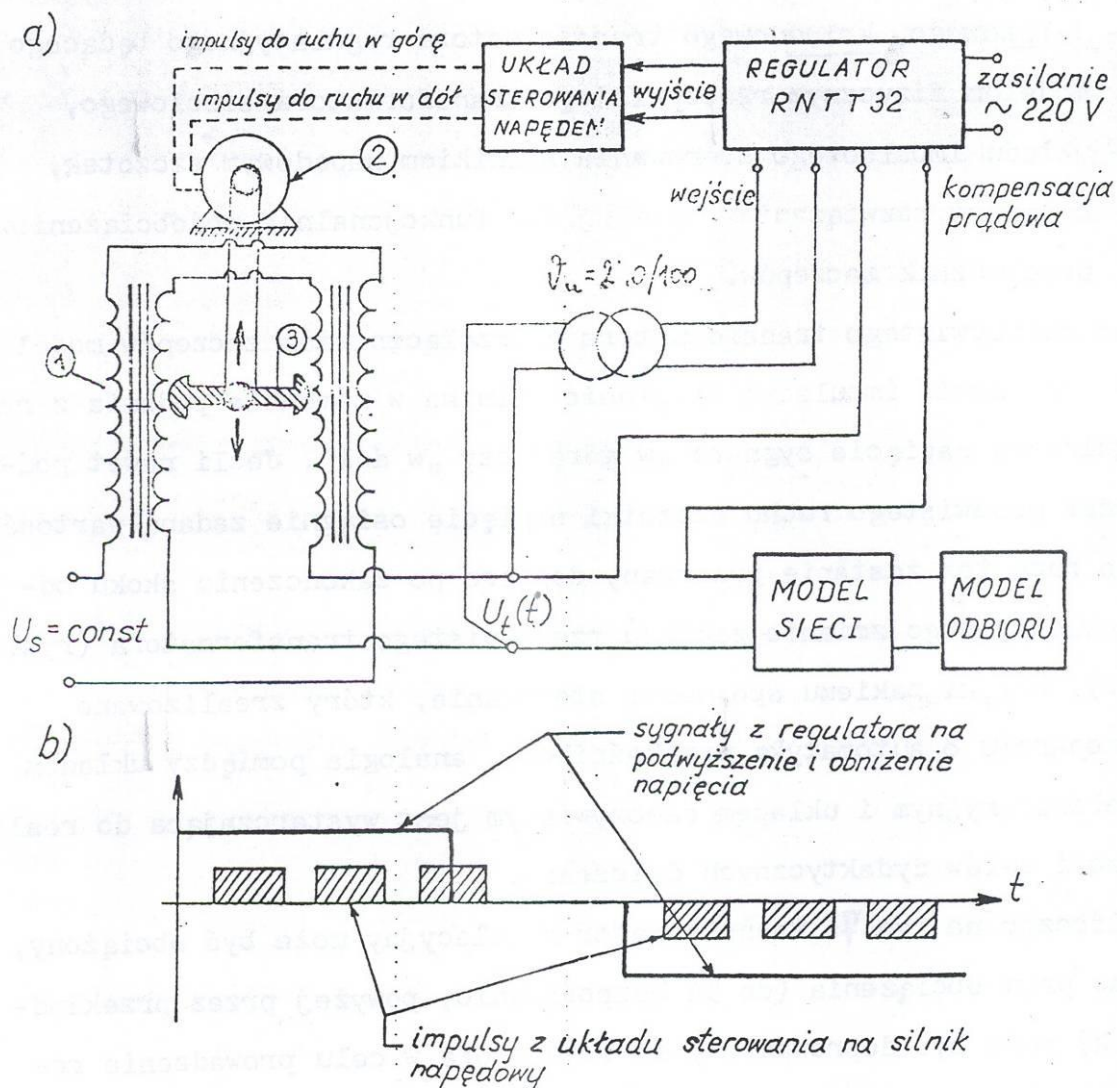
$$\underline{U}_K = \frac{1}{g_i} (I^c R_k - I^b X_k) + j \frac{1}{g_i} (-I^c X_k - I^b R_k) \quad (5.6)$$

(dławik odwraca fazę napięcia)

Porównując (5.5b) i 5.6) stwierdzamy, że gdy parametry układu kompensacyjnego spełniają zależności:

$$R_K = \frac{g_i}{g_u} X_2 \sqrt{3} \qquad X_K = \frac{g_i}{g_u} R_2 \sqrt{3}$$

Widzimy zatem, że rezystancja układu kompensacyjnego odpowiada rezystancji sieci, a reaktancja układu reaktancji sieci.



Rys.7.a) Schemat modelu laboratoryjnego: 1 – dwukolumnowy transformator regulacyjny, 2 – silnik napędowy, 3 – szczotki ruchome, b) zależności pomiędzy sygnałami regulatora oraz impulsami sterującymi silnikiem poruszającym szczotki

## 6 Opis laboratoryjnego modelu układu regulacji napięcia

### 6.1 Układ regulacji napięcia typu RNTT

Układ regulacji napięcia typu RNTT składa się z 3 elementów (rys.7):

- regulatora RNTT-32;
- 1-fazowego, kolumnowego transformatora regulacyjnego będącego modelem fizycznym rzeczywistego transformatora sieciowego,
- układu impulsowego sterowania silnikiem napędowym szczotek, będącego rozwiązaniem modelującym funkcjonalnie podobciążeniowy przełącznik zaczepów.

Do rzeczywistego transformatora z przełącznikiem zaczepów model ten upodabnia impulsowe działanie silnika w momencie podania z regulatora napięcia sygnału „w górę” czy „w dół”. Jeśli nawet podczas posuwistego ruchu szczotki napięcie osiągnie zadaną wartość, to ruch ten zostanie przerwany dopiero po zakończeniu skoku odpowiadającego zmianie zaczepu rzeczywistego transformatora (rys.7b). Dzięki takiemu sposobowi sterowania, który zrealizowano w oparciu o automatykę przekątnikową, analogia pomiędzy układem laboratoryjnym i układem rzeczywistym jest wystarczająca do realizacji celów dydaktycznych ćwiczenia. Widoczny na rys.7a transformator regulacyjny może być obciążony, zaś prąd obciążenia (do 5A bezpośrednio, powyżej przez przekładnik) może być doprowadzony do regulatora w celu prowadzenia regulacji z kompensacją spadku napięcia. Napięcie  $\Delta U_{z\%}$  (jeden skok szczotki) odpowiada, rzeczywistemu procentowemu napięciu zaczepu transformatorów.

## 7 Program ćwiczenia

W ćwiczeniu będą badane następujące zagadnienia dotyczące układów regulacji napięcia: *sprawdzanie kształtu charakterystyki statycznej regulatora, badanie warunków stabilnej pracy regulatora, badanie efektywności regulacji napięcia*. Jako pierwszy do badania zostaje wybrany regulator RNTT. W tym celu należy ustawić przełącznik dwupołożeniowy trójbiegunowy P1 w położenie odpowiadające pracy regulatora RNTT, włączyć zasilanie układu a następnie postępować zgodnie z opisem umieszczonym w poniższych punktach ćwiczenia (7.1, 7.2, 7.3). Po zrealizowaniu poszczególnych punktów, należy poddać badaniu cyfrowy regulator autotransformatora. W związku z tym należy przełączyć przełącznik dwupołożeniowy trójbiegunowy P1 w położenie odpowiadające włączeniu do obwodu regulatora cyfrowego, następnie włączyć zasilanie regulatora i przystąpić do badań, które

należy wykonać wg punktów 7.1, 7.2, opisanych poniżej. Po zakończeniu ćwiczenia, należy odłączyć napięcie zasilania od układu i przedstawić protokół z zapisanymi danymi pomiarowymi prowadzącemu laboratorium.

### *7.1 Sprawdzanie kształtu charakterystyki statycznej regulatora*

Przy wyłączonym napędzie szczotki transformatora regulacyjnego, zmieniając powoli  $U_{we}$  za pomocą autotransformatora, należy obserwować stan sygnalizacji świetlnej i wskazania woltomierza przyłączonego do zacisków przekładnika napięciowego. Dla podanej przez prowadzącego wartości napięcia zadanego nastawianego za pomocą zwór na przekładnikach A, B regulatora i dwóch wartości strefy nie działania  $\varepsilon$  nastawionych za pomocą potencjometru wyznaczyć wartości  $U_{dz}$ ,  $U_{dp}$ ,  $U_{gz}$ ,  $U_{gp}$  i naszkicować charakterystykę regulatora.

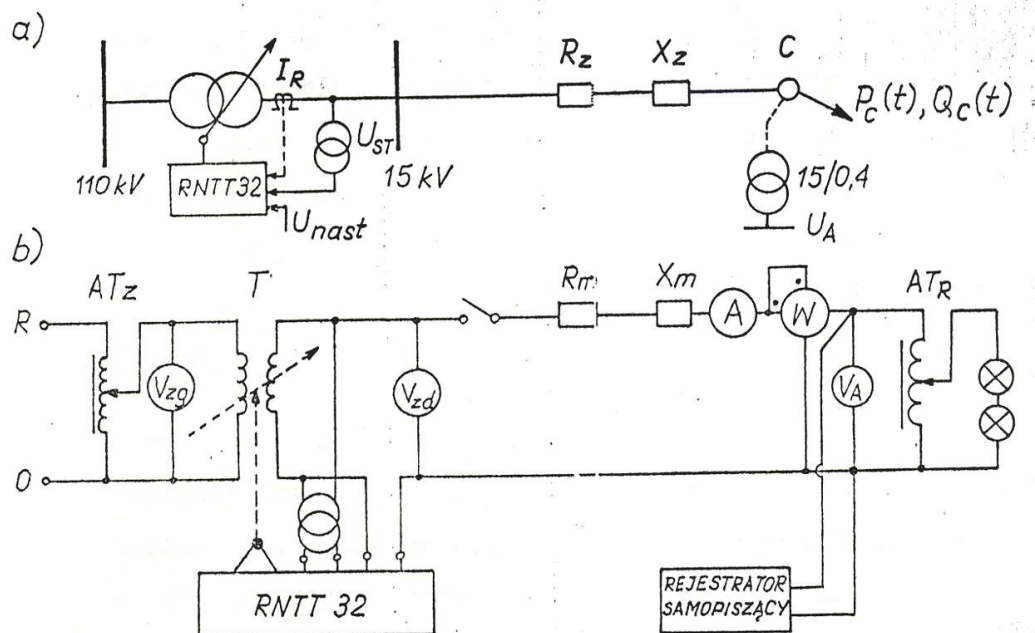
### *7.2 Badanie warunków stabilnej pracy regulatora*

Załączyć napęd szczotek transformatora regulacyjnego. Zmieniając  $U_{we}$  obserwować pracę układu sterowania napędem. Sprawdzić, że w przypadku gdy strefa nieczułości  $\varepsilon$  jest zbyt mała istnieje niebezpieczeństwo podawania na przemian sygnałów „w górę” i „w dół”, czyli stanu pracy niestabilnej regulatora.

### *7.3 Badanie wpływu kompensacji prądowej regulatora RNTT32 na proces regulacji napięcia*

Wykorzystując laboratoryjny układ regulacji napięcia należy zbadać wpływ zmiany obciążenia w punkcie C (rys. 8) na wartości napięć uzyskiwanych w procesie regulacji napięcia. Badania prowadzone są na modelu pojedynczej linii promieniowej zasilanej ze stacji 110/15kV. Schemat sieci rzeczywistej i modelu przedstawia rys. 8.





Rys. 8. Schematy a) sieci rzeczywistej, b) modelu do badania efektywności regulacji napięcia za pomocą regulatora RNTT32

Jest on zgodny z układem z ćwiczenia 7.1, w którym wyznaczono charakterystyki statystyczne regulatora. Po ustawieniu zadanej przez prowadzącego wartości napięcia (w stanie bez obciążenia) należy stopniowo zwiększać obciążenie aż do chwili pobudzenia regulatora. Po ustaleniu przez regulator stabilnych wartości napięć należy odczytać wskazania mierników (wartości napięć w GPZ i punkcie C oraz prądu i mocy obciążenia). Pomiary należy powtórzyć dla kolejno zwiększanych wartości prądów obciążenia. Na podstawie pomiarów wykreślić (na jednym wykresie w odpowiedniej skali) charakterystyki:

$$U_{GPZ} = f(I_{obc}) \text{ oraz } U_C = f(I_{obc}).$$

Powyższy algorytm należy powtórzyć po zablokowaniu układu kompensacji prądowej (należy pamiętać o zwarcie zacisków wtórnych przekładnika prądowego (rys. 8).

W ćwiczeniu badamy sieć, dla której  $R_z = 8,7\Omega$ ,  $X_z = 5\Omega$ , zaś moc  $P_C(t)$  zmienia od 500 kW do 4000 kW.

## 8 Literatura

1. Praca zbiorowa „Instrukcja eksploatacji układów regulacji napięcia transformatorów” SEP, Wrocław 1984.
2. Hellman W., Szczerba Z.: „Regulacja napięcia i częstotliwości w systemie elektroenergetycznym” WNT 1978.