

## ADAPTACYJNY ALGORYTM REGULACJI TRANSFORMATORÓW ZASILAJĄCYCH SIĘĆ ROZDZIELCZĄ

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

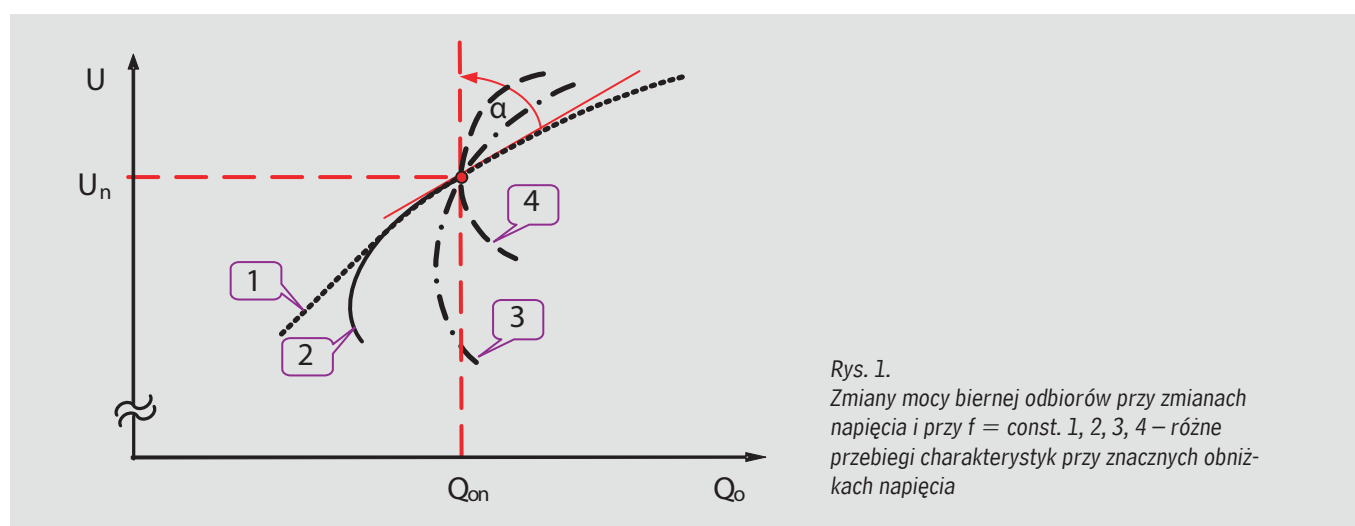
### 1. ANALIZA CELOWOŚCI BLOKOWANIA REGULATORÓW W NIENORMALNYCH STANACH NAPIĘCIOWYCH

#### 1.1. Charakterystyki odbiorów zasilanych przez transformatory

Podobnie jak w przypadku mocy czynnej, moc bierna pobierana przez odbiory jest funkcją napięcia  $U$  i częstotliwości. Ogólną zależność zmian mocy biernej, w otoczeniu punktu pracy, wywołaną zmianami  $f$  i  $U$ , przy założeniu stałości częstotliwości  $f = const.$ ,  $\Delta f = 0$  można opisać zależnością:

$$\Delta Q_o = \frac{\partial F(U, f)}{\partial U} \Delta U \quad (1)$$

W rzeczywistości podana wyżej linearyzacja jest dopuszczalna dla niewielkich zmian  $U$  i  $f$  w stanach ustalonych. Przy większych zmianach napięcia zależność  $Q_o = F(U, f)$  w stanach ustalonych, dla  $f = const.$ , jest nieliniowa i ma przebieg przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1.  
Zmiany mocy biernej odbiorów przy zmianach napięcia i przy  $f = const.$  1, 2, 3, 4 – różne przebiegi charakterystyk przy znacznych obniżkach napięcia

Rysunek pokazuje, że pochodna mocy biernej  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{dQ_o}{dU}$  w pewnych przedziałach zmian napięcia może być dodatnia lub ujemna.

Krzywe pokazane na rys. 1 mogą być przydatne zarówno do jakościowej, jak i – w przybliżeniu – do ilościowej interpretacji stanów nieustalonych przy przeciążeniu systemu mocą bierną, podsystemu lub wyspy. Na ogół przy znacznych obniżkach napięcia zależność może mieć charakter zbliżony do krzywej 1 (rys. 1). Przy pewnych rodzajach odbiorów zależność ta może mieć charakter zbliżony do krzywych 2, 3, a nawet – przy dużym udziale napędów asynchronicznych i baterii kondensatorów – zbliżony do krzywej 4. W tych sytuacjach znaczna obniżka napięcia powoduje wzrost poboru mocy biernej.

#### Streszczenie

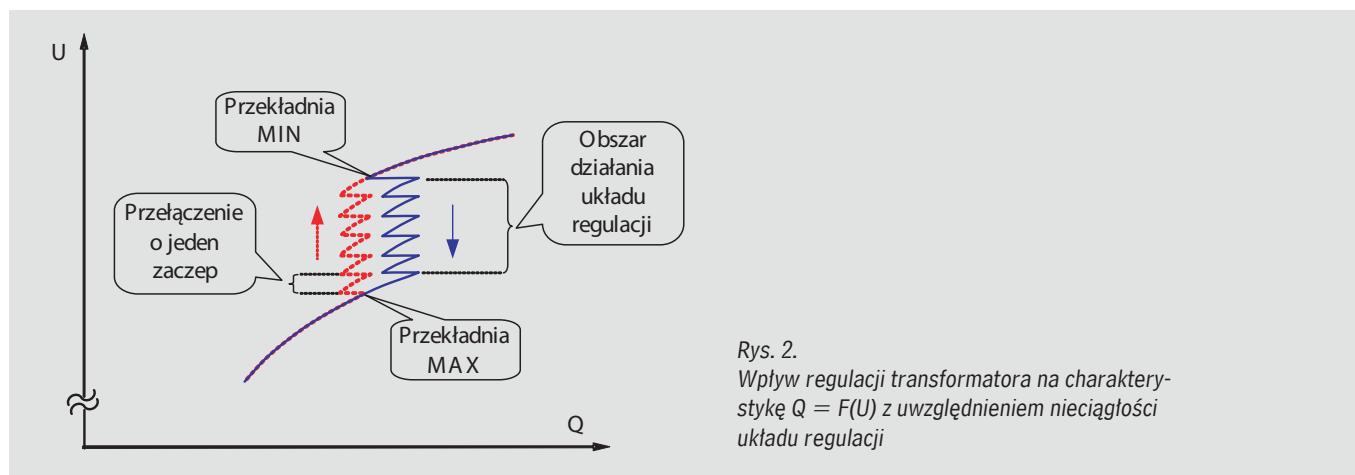
W niniejszym artykule opisano przykład nowego inteligentnego regulatora transformatora. Układ regulacji transformatorów 110/SN, z proponowanym algorytmem działania, umożliwia automatyczne dostosowanie algoryt-

mu działania regulatorów do aktualnych stanów systemu elektroenergetycznego (np. lawina napięcia) i w ten sposób może wpłynąć na wzrost bezpieczeństwa elektroenergetycznego.

Podobnie jak w przypadku mocy czynnej, rzeczywista charakterystyka tym bardziej odbiega od przedstawionej na rys. 1, im większa jest prędkość zmian napięcia, zależna od wartości przeciążenia. Rozbieżność jest spowodowana elektromagnetycznymi stanami nieustalonymi w silnikach elektrycznych i wpływem mas wirujących układów napędowych.

## 1.2. Wpływ regulacji napięcia transformatorów na charakterystyki odbiorów

Przy stałej przekładni obniżenie napięcia po stronie zasilania transformatora powoduje odpowiadające mu obniżenie napięcia po stronie wtórnej. Jeżeli regulator napięcia – pomimo obniżenia napięcia po stronie pierwotnej – utrzyma stałe napięcie po stronie wtórnej, to moc bierna pobierana nie będzie zależna od zmian napięcia po stronie pierwotnej i  $Q = const$ .



Rys. 2.  
Wpływ regulacji transformatora na charakterystykę  $Q = F(U)$  z uwzględnieniem nieciągłości układu regulacji

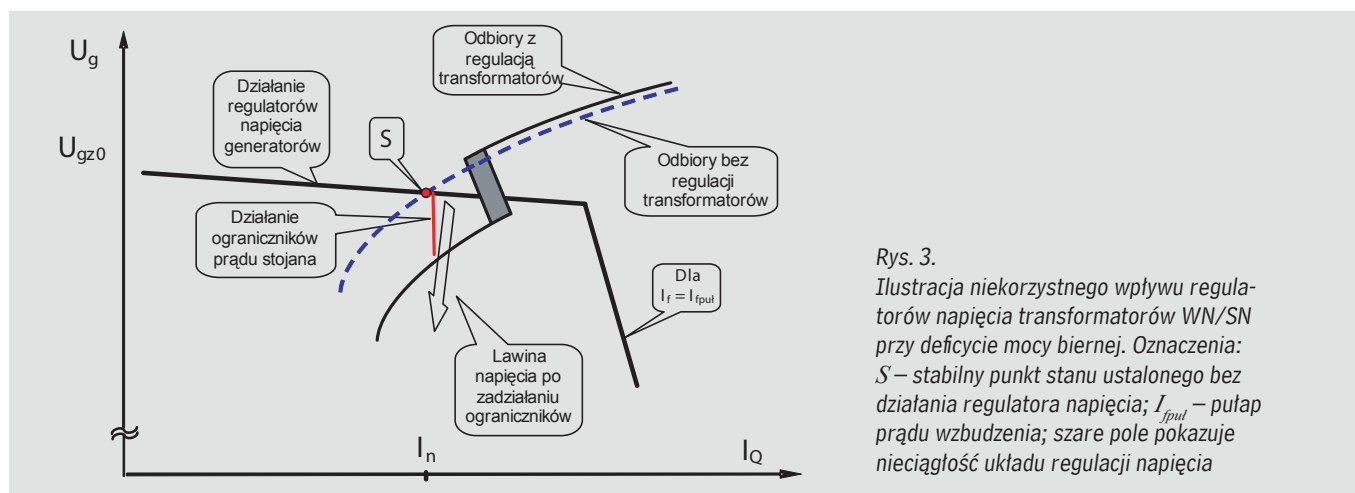
Taki stan będzie miał miejsce tylko wtedy, gdy przełącznik zaczepeków nie osiągnie jednego ze skrajnych położeń. W takim przypadku regulator nie będzie w stanie utrzymywać stałego napięcia po stronie wtórnej i charakterystyka  $Q = F(U)$  zacznie przybierać postać zbliżoną do części charakterystyki bez regulatora z modyfikacją spowodowaną zmienioną przekładnią w stosunku do wartości znamionowej.

W rzeczywistości układ regulacji transformatora jest układem regulacji nieciągłej ze strefą nieczułości i dużym opóźnieniem. Ilustrację takiego przypadku pokazano na rys. 2. Charakterystyki pokazane na rys. 1 obowiązują dla stanów ustalonych (po zakończeniu procesu regulacji). W przedstawionej postaci charakterystyki te mogą być wykorzystywane tylko w przypadkach powolnych zmian napięcia – wolniejszych niż działanie układów regulacji transformatorów.

W bardzo dużych przeciążeniach prędkość zmian napięcia może być tak duża, że regulatory nie zdążą zadziałać. W takich przypadkach do rozważań należy przyjmować charakterystyki pomijające działanie układów regulacji transformatorów z przekładniami takimi jak przed zakłóceniem.

## 1.3. Niekorzystny wpływ regulatorów napięcia transformatorów przy deficycie mocy biernej

W przypadku powolnych zmian stanu i rosnącym deficycie mocy biernej ma miejsce sytuacja przedstawiona na rys. 3.



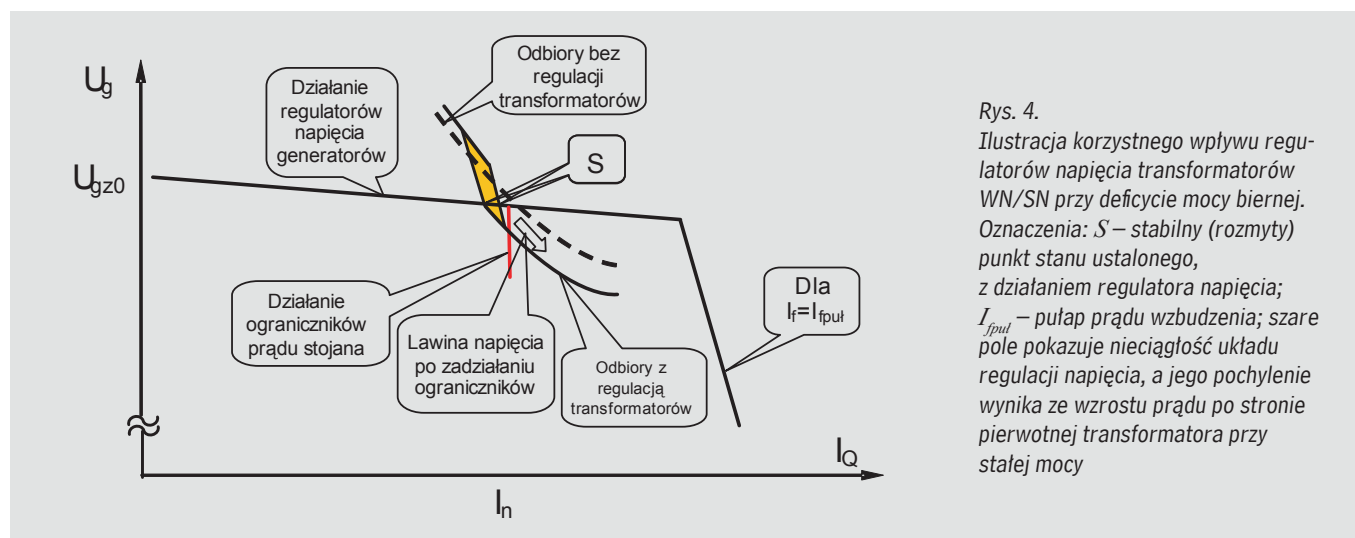
Rys. 3.  
Ilustracja niekorzystnego wpływu regulatorów napięcia transformatorów WN/SN przy deficycie mocy biernej. Oznaczenia:  $S$  – stabilny punkt stanu ustalonego bez działania regulatora napięcia;  $I_{fput}$  – pułap prądu wzbudzenia; szare pole pokazuje nieciągłość układu regulacji napięcia

Rys. 3 ilustruje przypadek niekorzystnego wpływu regulacji napięcia transformatorów na deficyt mocy biernej. Przy stałej przekładni uzyskuje się stabilny punkt pracy poniżej progu działania ograniczników. Działanie układu regulacji transformatora może spowodować zadziałanie ograniczników i lawinę napięcia.

W sieciach rozdzielczych z dużą liczbą napędów asynchronicznych i znaczącą mocą kondensatorów często

$\frac{dQ_o}{dU} < 0$ . Potwierdziły to rozważania teoretyczne i badania wykonane w pracy [1]. Oznacza to, że przy obniżaniu

się napięcia pobierana moc bierna rośnie. W takim przypadku naturalna charakterystyka odbiorów jest wyraźnie mniej korzystna od charakterystyki zdeterminowanej przez działanie regulatora napięcia transformatora, utrzymującego w pewnym zakresie stałe napięcie, i wynikający z tego stały pobór mocy biernej.



Rys. 4.

Ilustracja korzystnego wpływu regulatorów napięcia transformatorów WN/SN przy deficycie mocy biernej. Oznaczenia: *S* – stabilny (rozmyty) punkt stanu ustalonego, z działaniem regulatora napięcia;  $I_{fput}$  – pułap prądu wzbudzenia; szare pole pokazuje nieciągłość układu regulacji napięcia, a jego pochylenie wynika ze wzrostu prądu po stronie pierwotnej transformatora przy stałej mocy

Opisana szkodliwość blokowania regulatorów jest wyjaśniona na rys. 4. Przy charakterystykach poboru

mocy biernej przez sieć SN, o nachyleniu  $\frac{dQ_o}{dU} < 0$ , działający regulator napięcia transformatora prowadzi do

uzyskania stabilnego, rozmytego punktu pracy *S*, natomiast blokowanie działania regulatora prowadzi do trwałego deficytu mocy biernej, powodującego niestabilność aperiodyczną – lawinę napięcia.

Reasumując, dla wskazania potrzeby blokowania automatycznej regulacji konkretnego transformatora konieczna jest, co najmniej, znajomość współczynnika podatności napięciowej odbiorów widzianych z zacisków danego transformatora.

Pomiar charakterystyk, dla oszacowania ich wpływu na stabilność napięciową, może być dokonany przez personel właściciela sieci dystrybucyjnej w czasie normalnej eksploatacji.

Przykładowe wyniki wraz z komentarzem zawarto w źródłach [1].

## 1.4. Inteligentny regulator napięcia transformatora 110/SN

### 1.4.1. Wady blokady pasywnej regulacji automatycznej transformatora

Podejmowanie decyzji o blokowaniu działania regulatora transformatora na podstawie wyników pomiarów wykonanych off-line posiada jednak istotne wady:

- nie uwzględnia rozwoju i zmienności struktur odbiorów
- nie uwzględnia periodycznych zmian związanych z porami roku, warunkami atmosferycznymi, dniami roboczymi i świątecznymi
- pomiar dokonywany jest przy napięciach bliskich normalnych wartości eksploatacyjnych. Niemożliwe jest obniżenie napięcia do wartości zakłócającej normalną pracę odbiorów. Jest to o tyle istotne, że jeśli oszacowany w wyniku prób współczynnik podatności napięciowej (wykonanych przy napięciu roboczym) jest bliski zeru, to należy się spodziewać, że przy napięciu znacznie niższym będzie on ujemny.

Opisane wyżej wady pasywnego blokowania regulatorów uwypukla zmienność w czasie charakterystyk poboru mocy biernej przez sieć SN, zasilaną przez dany transformator 110/SN. Zmienia się liczba i obciążenie



napędów asynchronicznych, zmieniają się moce baterii kondensatorów itp. Oznacza to, że dana sieć SN może mieć w pewnych okresach  $\frac{dQ_o}{dU} > 0$ ,  $\frac{dQ_o}{dU} \approx 0$  lub  $\frac{dQ_o}{dU} < 0$ . Nie jest więc możliwe jednorazowe, pomiarowe określenie znaku  $\frac{dQ_o}{dU}$  i zdeterminowanie regulatorów napięcia, dla których blokada napięciowa jest pożyteczna lub szkodliwa. Omawiane zmiany charakterystyk mogą mieć cykle sezonowe, tygodniowe, a nawet dobowe.

Dla prawidłowej decyzji: blokować czy nie, konieczna jest bieżąca identyfikacja zmieniającej się w czasie pochodnej  $\frac{dQ_o}{dU_o}$  w otoczeniu aktualnej wartości napięcia  $U_{Td}$  po stronie SN transformatora.

Prawidłowa decyzja o blokowaniu powinna być oparta na znanych charakterystykach w chwili podejmowania decyzji. Potrzebna jest więc znajomość pochodnej  $\frac{dQ_o}{dU_o}$  on-line.

## 2. OPIS ALGORYTMU DZIAŁANIA

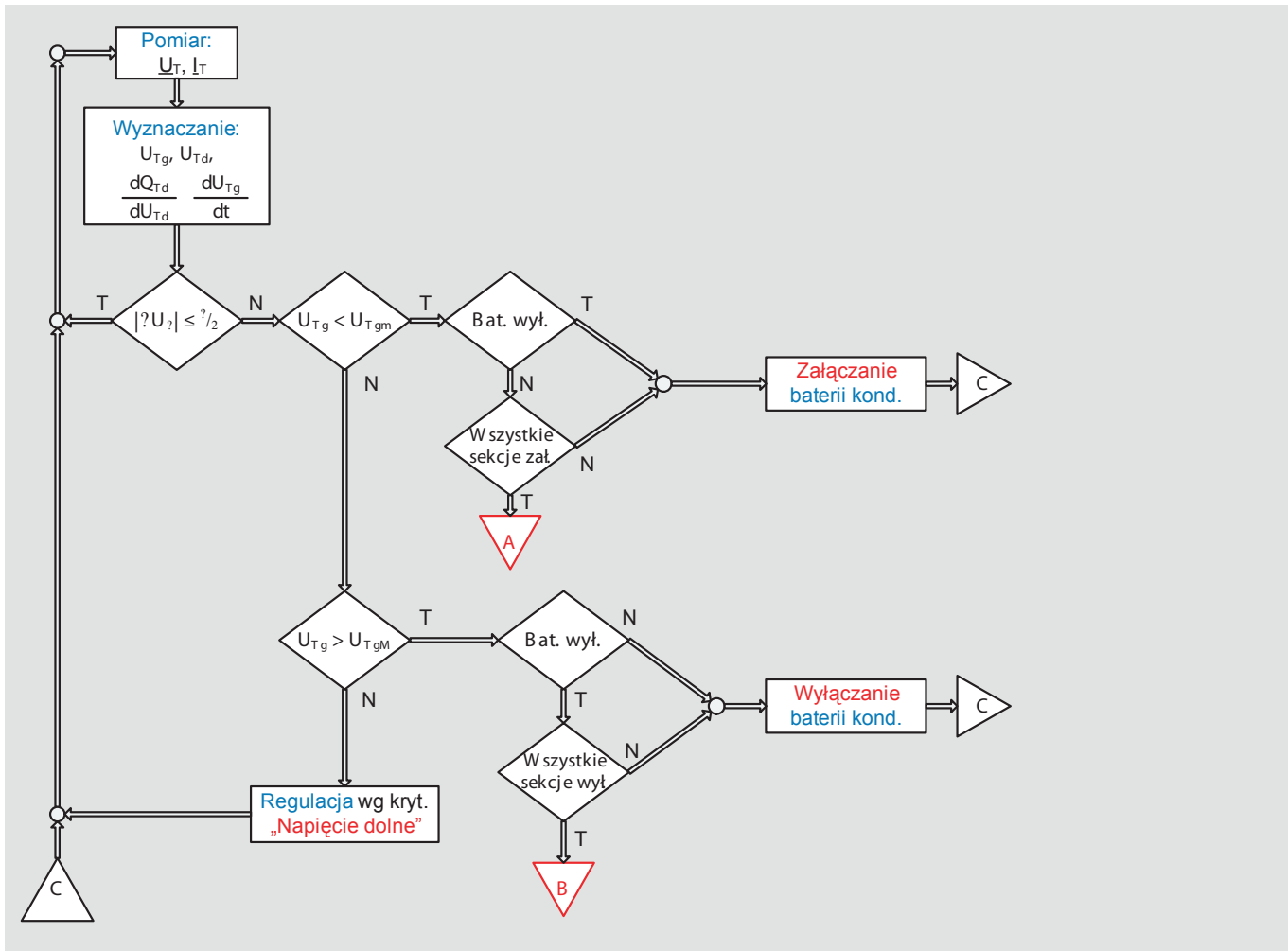
Proponowany przez autorów algorytm działania zapewnia dostosowanie regulacji transformatorów do aktualnego stanu systemu elektroenergetycznego i dzięki temu może w znaczący sposób przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa elektroenergetycznego.

W przykładowej realizacji sposób regulacji transformatorów zasilających sieć rozdzielczą 110/SN może przebiegać następująco: w zadanych odstępach czasowych mierzy się i rejestruje wartości napięcia po obu stronach transformatora, tj. napięcie górne transformatora  $U_{Tg}$  i napięcie dolne transformatora  $U_{Td}$  oraz bieżącą wartość mocy biernej po stronie dolnej transformatora  $Q_{Td}$ , tj. po stronie odbiorów SN. Na tej podstawie na bieżąco

określa się współczynnik podatności napięciowej mocy biernej odbiorów  $\frac{dQ_{Td}}{dU_{Td}}$  i w zależności od jego wartości oraz wartości napięcia górnego  $U_{Tg}$  i bieżącej szybkości zmian napięcia górnego  $\frac{dU_{Tg}}{dt}$  podejmuje się decyzję, czy

ma być utrzymywana bieżąca zadana wartość napięcia dolnego  $U_{Td}$  poprzez przetaczanie zaczełów transformatora, czy też należy wstrzymać regulację (praca transformatora ze stałym zaczeplem). Dla węzła sieci rozdzielczej zaopatrzonego w baterię kondensatorów, gdy bieżąca wartość napięcia górnego transformatora znajduje się poza zakresem określonym przez zadaną minimalną wartość napięcia górnego  $U_{Tgzm}$  i zadaną maksymalną wartość napięcia górnego  $U_{Tgzm}$ , w pierwszej kolejności dokonuje się próby regulacji poprzez odpowiednie załączenie lub wyłączenie kolejnych sekcji baterii kondensatorów (rys. 5).

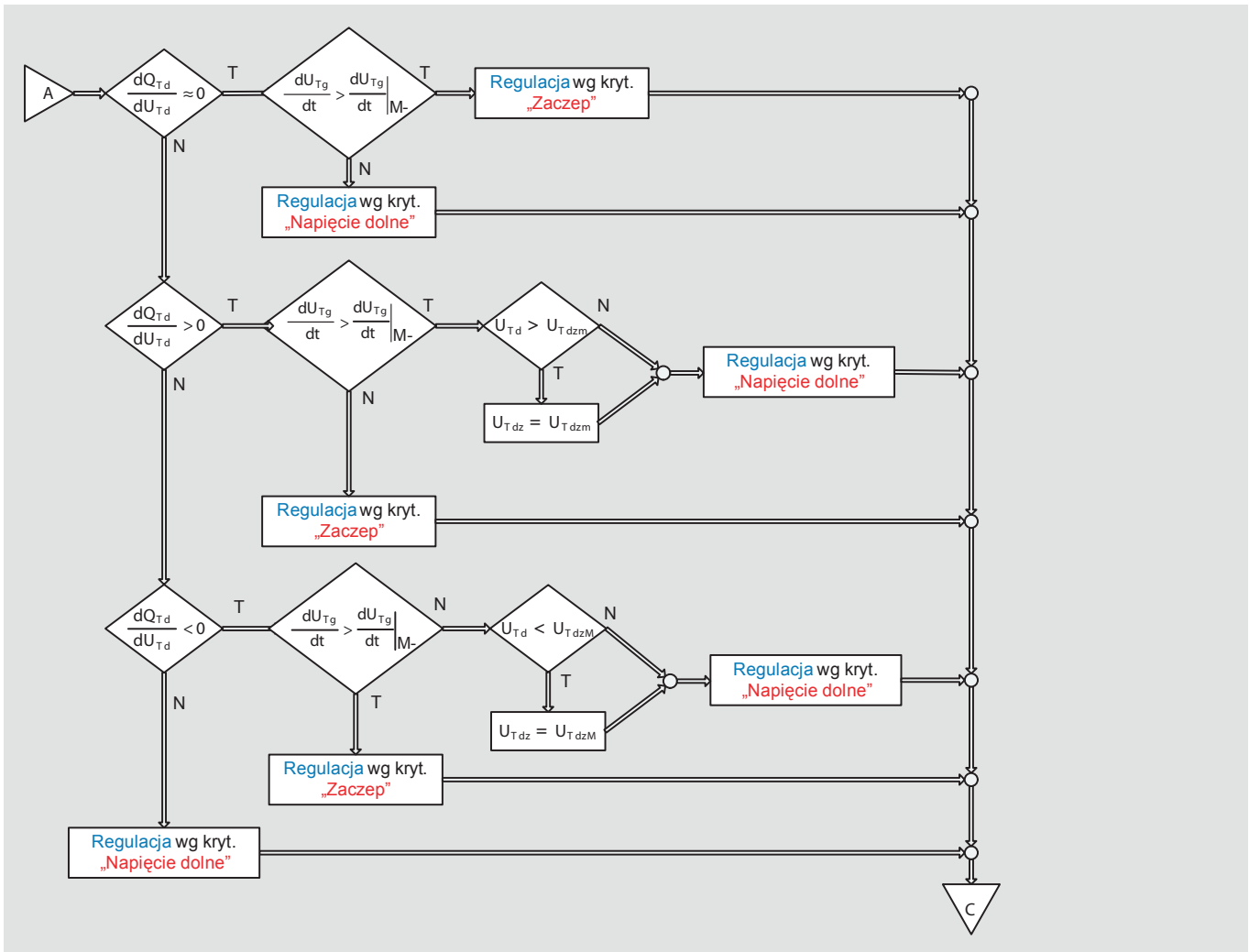




Rys. 5. Schemat algorytmu odpowiadający za wykorzystanie źródeł mocy biernej, np. baterii kondensatorów<sup>1</sup>

W sytuacji, gdy bieżąca wartość napięcia górnego  $U_{Tg}$  mieści się w zakresie określonym przez  $< U_{Tgzm}; U_{TgzM} >$ , utrzymuje się bieżącą zadaną wartość napięcia dolnego  $U_{Td}$  poprzez przełączanie zacze- pów transformatora. W sytuacji, gdy wartość górnego napięcia  $U_{Tg}$  wykracza poza dopuszczalny zadany zakres i nie daje się wyregulować za pomocą baterii kondensatorów, sterowanie przekładnią transformatora odbywa się w kierunku poprawiającym stabilność napięciową odpowiednio przy deficycie lub nadmiarze mocy biernej.

1 Proces załączania i wyłączania baterii kondensatorów nie został tu szczegółowo przedstawiony.



Rys. 6. Diagram algorytmu adaptacyjnego regulatora transformatora 110 kV/SN. Przypadek zbyt niskiego napięcia

Przykładowo, przy deficycie mocy biernej regulacja odbywa się w następujący sposób (rys. 6):

- jeżeli  $\frac{dQ_o}{dU} \approx 0$  – utrzymywana jest stała przekładnia lub zadane uprzednio napięcie dolne  $U_{Tdz}$
- stałą przekładnię utrzymuje się, gdy bieżąca szybkość zmian napięcia górnego  $\frac{dU_{Tg}}{dt}$  przekracza zadaną ujemną szybkość zmian napięcia górnego  $\left. \frac{dU_{Tg}}{dt} \right|_{M-}$ , a w przeciwnym przypadku utrzymuje się bieżące zadane napięcie dolne  $U_{Tdz}$  poprzez zmianę zaczepeków transformatora
- jeżeli  $\frac{dQ_o}{dU} > 0$  – utrzymywana jest stała przekładnia lub obniżane jest napięcie po stronie dolnej transformatora do dopuszczalnej zadanej minimalnej wartości napięcia dolnego  $U_{Tdzm}$ , a następnie utrzymywana jest zadana wartość  $U_{Tdzm}$
- stała przekładnia jest utrzymywana, gdy bieżąca szybkość zmian napięcia górnego  $\frac{dU_{Tg}}{dt}$  przekracza zadaną ujemną szybkość zmian napięcia górnego  $\left. \frac{dU_{Tg}}{dt} \right|_{M-}$ , natomiast gdy bieżąca szybkość zmian napięcia górnego  $\frac{dU_{Tg}}{dt}$  nie przekracza zadanej ujemnej szybkości zmian napięcia górnego  $\left. \frac{dU_{Tg}}{dt} \right|_{M-}$ , a bieżąca wartość napięcia dolnego  $U_{Td}$  jest większa od zadanej minimalnej wartości napięcia dolnego  $U_{Tdzm}$  – napięcie dolne, poprzez przełączanie zaczepeków transformatora, doprowadza się do tej zadanej wartości minimalnej

- jeżeli  $\frac{dQ_o}{dU} < 0$  – utrzymywane jest uprzednio zadane napięcie po stronie dolnej transformatora  $U_{Td}$

lub podwyższane jest to napięcie do dopuszczalnej zadanej maksymalnej wartości napięcia dolnego  $U_{TdM}$ , a następnie utrzymywana jest ta zadana wartość  $U_{TdM}$

- napięcie dolne doprowadza się do zadanej maksymalnej wartości, gdy bieżąca szybkość zmian napięcia

górnego  $\frac{dU_{Tg}}{dt}$  nie przekracza zadanej ujemnej szybkości zmian napięcia górnego  $\frac{dU_{Tg}}{dt} \Big|_{M-}$ , a bieżąca

wartość napięcia dolnego  $U_{Td}$  jest mniejsza od zadanej maksymalnej wartości napięcia dolnego  $U_{TdM}$ .

Zaproponowany algorytm może być realizowany automatycznie poprzez próbkowanie w czasie odpowiednich wielkości, polegające na wprowadzaniu do pamięci wartości napięcia po obu stronach transformatora i mocy biernej po stronie odbiorów SN na bieżąco, w zadanych odstępach czasu, nastawialnych w granicach, np. od kilku do kilkudziesięciu sekund. Jeśli utrzymywana jest zadana wartość napięcia po stronie SN, wysyłany jest sygnał przełączenia zaczepru (identyfikujący chwilę przełączenia), do pamięci wprowadzane są wartości napięcia i mocy przed przełączeniem i po uzyskaniu nowego stanu ustalonego po przełączeniu zaczepru. Rejestracja i obróbka mierzonych na bieżąco oraz przed i po zadziałaniu przełącznika zaczeprów wartości napięcia i mocy umożliwia wykrywanie tendencji do powstawania lawiny napięcia w systemie elektroenergetycznym oraz identyfikację sytuacji, w których blokowanie regulacji jest korzystne lub szkodliwe.

### 3. PODSUMOWANIE

Jak wykazano w części teoretycznej referatu, wyposażone w blokadę podnapięciową regulatory napięcia transformatorów 110/SN, utrzymujące zadaną wartość napięcia po stronie SN, mogą działać niekorzystnie w sytuacji deficytu mocy biernej w systemie elektroenergetycznym, sprzyjając powstawaniu lawiny napięć. Niekorzystne działanie występuje wówczas, gdy obniżanie napięcia po stronie SN powoduje wzrost poboru mocy biernej.

Z powodu zmian rodzaju odbiorów w czasie nie jest możliwe określenie (na podstawie pomiarów okresowych) sytuacji, w których należy stosować stałą blokadę lub stałą zmianę algorytmu działania regulatorów.

Adaptacyjny układ regulacji transformatorów 110/SN, z proponowanym algorytmem działania, zapewni automatyczne dostosowanie algorytmu działania regulatorów do aktualnych stanów systemu elektroenergetycznego i w ten sposób poprawi bezpieczeństwo elektroenergetyczne.

### BIBLIOGRAFIA

1. Małkowski R., Szczerba Z., Praca realizowana w ramach PBZ-MEiN-1/2/2006, „Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju? Zadanie 8.4.1.
2. Szczerba Z., Czy stosować blokadę napięciową regulatorów transformatorów 110/SN?, Materiały X Ogólnopolskiej Konferencji Zabezpieczenia Przekaznikowe w Energetyce, Komitet Automatyki Elektroenergetycznej SEP, Nałęczów, październik 2007.
3. Zgłoszenie patentowe numer P391598, tytuł: Sposób regulacji transformatorów zasilających sieć rozdzielczą, czerwiec 2010.
4. Małkowski R., Szczerba Z., Wpływ struktury, algorytmów działania oraz nastawień układów regulatorów transformatorów 110/SN na możliwość powstania i przebieg awarii napięciowej, materiały konferencji APE '09, Jurata, czerwiec 2009.

