



mgr inż. Marcin DĘBEK, e-mail: marcin.debek@olmex.pl
OLMEX S.A.

dr inż. Witold HOPPEL, e-mail: witold.hoppel@alpinex.pl
Politechnika Poznańska

s. 34 - 46

DOI: 10.17274/AEZ.2015.22.03

Zabezpieczenia baterii kondensatorów równoległych do kompensacji mocy biernej w sieciach średniego napięcia

Protection of Shunt Capacitor Bank Applied for Reactive Power Compensation in MV Network

Abstract: The article presents the basic information concerning erection capacitor banks, which are used in MV network for reactive power compensation. Rules for the short-circuit, overloads, growth and undervoltage protection are introduced. This article is supported to be aid for specialist designing and exploiting capacitors in MV switch board station.

Streszczenie: W artykule przedstawiono podstawową informację o budowie baterii kondensatorów stosowanych do kompensacji mocy biernej w sieciach średnich napięć. Podano zasady zabezpieczania od skutków zwarć, przeciążeń, wzrostu i obniżenia napięcia. Zaproponowano nowy sposób zabezpieczania od skutków przeciążeń baterii kilkuczłonowej i wprowadzenie zabezpieczenia napięciowego od skutków zwarć wewnętrznych dla baterii podzielonej na dwa układy gwiazdowe. Artykuł ma być pomocą dla osób projektujących, uruchamiających i eksploatujących kondensatory w rozdzielniach średniego napięcia.

Keywords: medium voltage switchgear, shunt capacitor bank, protection, protection settings

Słowa kluczowe: rozdzielnia średniego napięcia, bateria kondensatorów równoległych, zabezpieczenia, dobór nastaw zabezpieczeń

1. WSTĘP

Artykuł dotyczy zabezpieczeń oraz ich nastaw w obwodach baterii kondensatorów równoległych do kompensacji mocy biernej w sieciach średnich napięć. Takie ograniczenie tematu wynika ze sposobu budowy baterii, który w sieciach o napięciach wyższych jest bardziej złożony. Tematykę tę dość słabo poruszano w polskiej literaturze. Należy tu wspomnieć o publikacjach już prawie historycznych [5, 6, 7], opartym na nich artykule [2] czy o zawierającej inne ujęcie zagadnienia pracy [3].

Współczesne podejście do problemu zawarto w publikacji [1]. Obecnie w wykazie norm znajduje się jej wersja angielska [8]. Można się spodziewać, że zmiany są minimalne, szczególnie w odniesieniu do tematyki poruszanej w tym artykule.

Niniejszy tekst powstał przy współpracy dwóch autorów wywodzących się z różnych środowisk: pierwszy jest praktykiem zajmującym się na co dzień problematyką kondensatorów, a drugi pracuje nad zasadami doboru nastaw zabezpieczeń dla różnych elementów sieci średnich napięć.

2. DEFINICJE

W celu uporządkowania terminów podaje się kilka definicji, które ułatwiają czytanie tekstu.

Napięcie nominalne sieci – odpowiednia przybliżona wartość napięcia międzyprzewodowego określająca lub identyfikująca sieć (przykłady: sieć 15 kV, 20 kV).

Wartość znamionowa – wartość wielkości przypisana, zasadniczo przez wytwórcę konkretnemu urządzeniu w ściśle określonych sieciowych i środowiskowych warunkach pracy.

Przykładem jest transformator o napięciu znamionowym 115 kV, który pracuje w sieci o napięciu nominalnym 110 kV. Do napięcia znamionowego odnoszone są różne inne wielkości, np. prąd znamionowy, napięcie zwarcia, straty.

W zasadzie napięcie znamionowe urządzenia powinno być wyższe od najwyższego dopuszczalnego napięcia roboczego sieci. Bateria kondensatorów powinna być przypisana do określonego napięcia znamionowego lub napięcia nominalnego sieci.

Zwijka kondensatorowa – najmniejsza niepodzielna część kondensatora składająca się z dwóch elektrod oddzielonych dielektrykiem [9].

Jednostka kondensatorowa – jedna zwijka lub więcej zwijek zamkniętych we wspólnej obudowie z wyprowadzonymi na zewnątrz zaciskami [9].

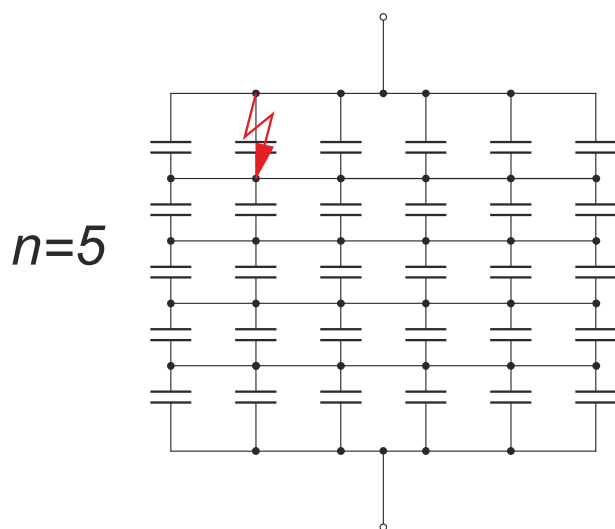
Bateria kondensatorów – zestaw połączonych ze sobą jednostek kondensatorowych przyłączony w jednym polu rozdzielni [9].

Stos kondensatorów – zespół jednostek kondensatorowych połączonych szeregowo [10]. Pojęcie nie jest używane w dalszej części artykułu, ale zostało dodane jako ściśle związane z jego tematyką.

Napięcie szczytkowe – napięcie pozostające na zaciskach kondensatora po określonym czasie od chwili jego odłączenia od źródła zasilania [9].

Przykładowy schemat jednostki kondensatorowej pokazano na rysunku 1. Charakteryzuje ją:

- liczba zwijek równolegle połączonych w grupie ($M = 6$),
- liczba grup zwijek połączonych szeregowo w jednostce kondensatorowej ($n = 5$).



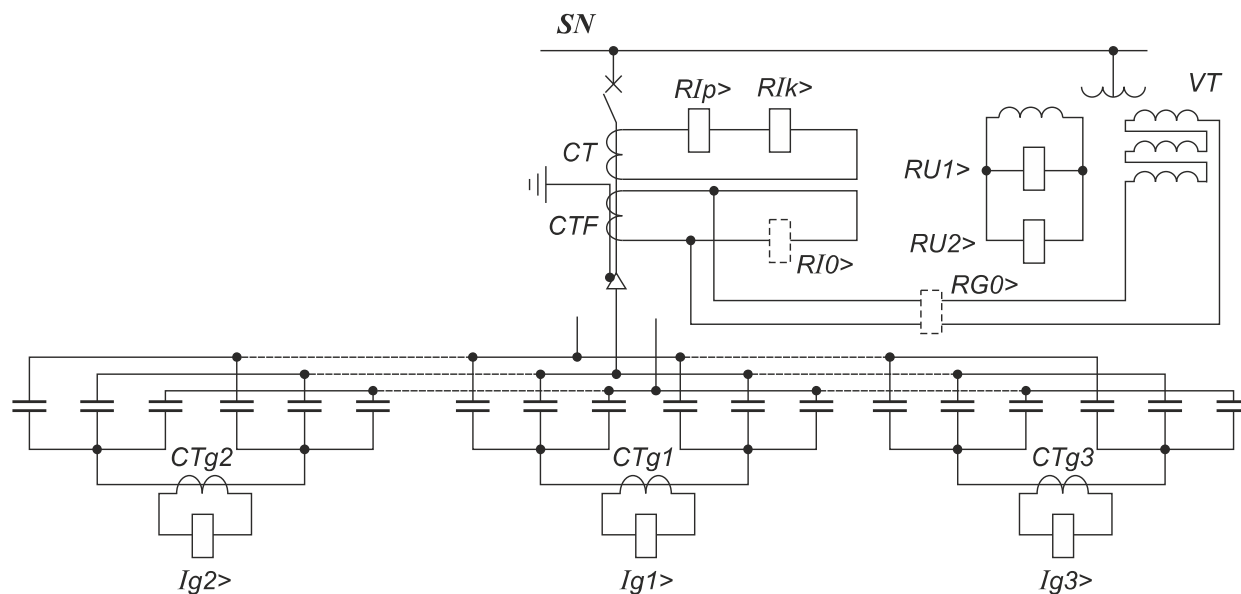
W jednostce tej nie ma bezpieczników w poszczególnych zwijkach i tak przeważnie wykonuje się jednostki przeznaczone do sieci o napięciu nominalnym z zakresu (15÷20) kV. Zwarcie jednej zwijki powoduje w takiej sytuacji wyłączenie z pracy całej grupy zwijek połączonych równolegle. Wprowadzenie bezpieczników w szereg ze zwijkami jest wskazane, bo wówczas podczas zwarcia jednej z nich następuje po prostu jej wyłączenie z pracy.

Rys. 1. Budowa jednostki kondensatorowej dla SN.

Symbol kondensatora oznacza pojedynczą zwijkę

Fig. 1. Construction of the capacitor unit analyzed in the article.

In the figure symbol of capacitor indicates a single element



Rys. 2. Zabezpieczenia trzyczłonowej baterii kondensatorów: CT, CTF – przekładniki prądowe,

VT – przekładniki napięciowe w układzie gwiazdy do pomiaru napięć i w układzie otwartego trójkąta dla składowej zerowej napięcia

Fig. 2. Protection system of three-steps capacitor bank: CT – current transformer, CTF – residual current transformer,

VT – residual voltage transformer

Rysunek 2 przedstawia kompletną baterię kondensatorów złożoną z trzech członów – stopni. Każdy z tych członów ma swój łącznik (niezaznaczony na schemacie), który służy tylko do celów ruchowych, a nie jest w stanie wyłączać prądów zwarciovych i z tego powodu nie znalazł się na schemacie zabezpieczeń. Bateria ma także dławiki do ograniczenia prądów załączeniowych, które nie mają znaczenia dla zabezpieczeń, dlatego zostały pominięte. Wszystkie człony mają wspólny wyłącznik, który przerywa również prądy zwarciove. Na tym rysunku symbol kondensatora oznacza jedną jednostkę kondensatorową. Pojedynczy człon baterii średniego napięcia może mieć M jednostek połączonych równolegle ($M = 1$), ale nie stosuje się szeregowego łączenia jednostek (wobec czego $n = 1$).

3. DOBÓR ZABEZPIECZEŃ

Według instrukcji KE ENEA [4], lecz również każdego z pozostałych trzech koncernów działających w Polsce, baterie kondensatorów równoległych należy wyposażać w:

- a) **zabezpieczenie nadprądowe przeciążeniowe**, które powinno w kryterium działania korzystać z wartości skutecznej prądu lub w inny sposób uwzględniać wpływ wyższych harmonicznych;
- b) **zabezpieczenie od zwarc wewnątrznych**,
- c) **zabezpieczenie nadprądowe od zwarc zewnętrznych**;
- d) **zabezpieczenie nadnapięciowe**.

Instrukcja zawiera także dopisek: „Każde wyłączenie pola SN transformatora 110 kV/SN powinno skutkować otwarciem wyłącznika pola baterii kondensatorów”.

Jednocześnie warto zwrócić uwagę na zapis w tej instrukcji mówiący o tym, że „... podano [w 4] wymagania minimalne. W poszczególnych urządzeniach lub polach można stosować dodatkowe zabezpieczenia działające na wyłączenie lub sygnalizację”.

Nie ma więc ograniczeń w wyposażaniu pól baterii kondensatorów w inne zabezpieczenia, jeśli jest to uzasadnione. Jednocześnie warto brać pod uwagę to, że nieostrożnie dodane zabezpieczenie może być przyczyną zbędnych wyłączeń, co nie jest zjawiskiem pożądanym.

Uproszczony schemat rozmieszczenia poszczególnych zabezpieczeń pokazano na rysunku 2. Nie zaznaczono na nim wykonanych uziemień obwodów wtórnych. Zabezpieczenia napięciowe mogą być zasilane z pola pomiaru napięcia. Pełne wyposażenie zabezpieczeniowe pola baterii kondensatorów składa się więc z następujących elementów:

- 1) **zabezpieczeń nadprądowych zwłocznych** od przeciążeń ($RIp>$).
- 2) **zabezpieczenia nadprądowego bezzwłocznego** ($RIk>$) – pewna modyfikacja publikacji [4]: musi być pewne minimalne opóźnienie czasowe dla uniknięcia wyłączeń podczas stanów nieustalonych, szczególnie podczas załączania baterii,
- 3) **zabezpieczenia od zwarc wewnątrznych** ($RIg>$) – można stosować zabezpieczenie, w którym wielkość charakterystyczną stanowi największa dopuszczalna różnica prądów fazowych, ale najlepszym rozwiązaniem jest podział każdej baterii na dwa układy gwiazdowe i pomiar prądu w przewodzie pomiędzy ich punktami gwiazdowymi,
- 4) **zabezpieczeń nadnapięciowych** ($RU>$) – najlepiej, aby były aż czterostopniowe; na rysunku 2 zaznaczono dwa stopnie: $RU1>$, $RU2>$,
- 5) **zabezpieczenia ziemnozwarciowego** ($RI0>$, $RG0>$) – do tej pory zwyczajowo stosowano je tylko w sieci o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor; wydaje się, że warto użyć w każdej sieci, chociażby dla zabezpieczenia kabla łączącego baterię z rozdzielnią,
- 6) **zabezpieczenia podnapięciowego** ($RU<$),
- 7) **zabezpieczenia przed załączeniem nierozładowanej baterii** (nie ma na schemacie).

4. ZABEZPIECZENIE NADPRĄDOWE PRZECIĄŻENIOWE

Przeciążenie baterii może być spowodowane nadmiernym wzrostem napięcia i/lub znaczącym odkształceniem napięcia.

Wartości nastaw zabezpieczeń nadprądowych przeciążeniowych wynikają z zasad wiedzy technicznej [8, 9]:

- **przeciążalność prądowa jednostek kondensatorowych wynosi 30%,**
- **dopuszczalna odchyłka pojemności** (jednostek kondensatorowych i całej baterii)
 - do 3 Mvar powinna być zawarta pomiędzy $(-5 \div 10)\%$ wartości znamionowej,
 - w zakresie od 3 Mvar do 30 Mvar nie powinna się różnić od znamionowej – **o więcej niż $(0 \div 10)\%$.**

Zabezpieczenie nadprądowe od skutków przeciążeń oznaczone na rysunku 2 jako R_{Ip} należy więc nastawić według zależności:

$$I_{nast} = \frac{k_b k_{pp} k_{bc} I_n}{g_i} \quad (1)$$

gdzie:

I_n – prąd znamionowy całej baterii lub członu podlegającego zabezpieczeniu,

g_i – przekładnia przekładników prądowych,

k_b – współczynnik bezpieczeństwa, dla przekładników 5P wynosi 0,95, dla przekładników 10P – 0,9 (współczynnik bezpieczeństwa jest mniejszy od 1, ponieważ bateria jest bardzo czuła na przeciążenie, a błąd przekładnika może być ujemny),

k_{pp} – współczynnik przeciążalności prądowej baterii, wg [8, 9] należy przyjąć 1,3, chyba że producent podaje inną wartość,

k_{bc} – współczynnik uwzględniający rzeczywistą pojemność baterii kondensatorów,

$$k_{bc} = \frac{C_{rz}}{C_n} \quad ,$$

przy czym:

C_{rz} – rzeczywista pojemność baterii lub członu,

C_n – pojemność znamionowa baterii lub członu,

jeśli brakuje danych, to należy przyjmować $k_{bc} = 1$.

Można próbować określić prąd znamionowy pomiarowo po zainstalowaniu baterii. Jednakże należy wziąć pod uwagę relację napięcia roboczego do znamionowego baterii i wyższe harmoniczne. Wynik może więc być obciążony dużym błędem.

Wskazane jest, by opóźnienie czasowe przyjmować w granicach $(0,5 \div 10)$ s, przy czym zalecane są wartości rzędu $(0,5 \div 2,0)$ s.

Każde odchylenie w zależności (1) od nastawy właściwej może być kłopotliwe w eksploatacji. Zaniżenie wartości może powodować zbędne wyłączenia, a zawyżenie nastawy – niewykryte przeciążenie, które jest dla baterii bardzo groźne. Z tego powodu współczynnik bezpieczeństwa zależy od zastosowanych przekładników prądowych. Błąd prądowy przekładników 5P przy znamionowym prądzie pierwotnym, który jest zbliżony lub nieco większy od $1,3 I_n$ prądu znamionowego baterii, wynosi $\pm 1\%$ (dla 10P – $\pm 3\%$). Jednakże wczytując się w normę dotyczącą przekładników prądowych, zauważa się, że błąd jest podany dla obciążenia indukcyjnego o współczynniku mocy 0,8 lub obciążenia o współczynniku mocy 1 i dla znamionowej częstotliwości, czyli harmonicznej podstawowej. Przekładniki baterii pracują przy współczynniku mocy prawie równym zero i to pojemnościowym, a przeciążenie baterii następuje najczęściej z powodu zniekształcenia napięcia wyższymi harmonicznymi. Stąd przyjęto wartości dla błęd całkowitego $\pm 5\%$ (współczynnik bezpieczeństwa 0,95) lub $\pm 10\%$ (współczynnik bezpieczeństwa 0,9).

Warto też zauważyć, że na szynach zbiorczych, do których jest przyłączona bateria, napięcie robocze przeważnie wynosi $(1,05 \div 1,1)$ napięcia nominalnego sieci. Jeśli producent podaje, że napięcie znamionowe baterii jest równe

napięciu nominalnemu sieci, to bateria cały czas pracuje przeciążona o kilka procent, co jest dopuszczalne. Lepiej, jeśli producent podaje, że bateria ma napięcie znamionowe o określonej wartości. Prąd znamionowy podaje się wówczas dla tego napięcia. Jest tutaj pewne zamieszanie dotyczące parametrów znamionowych.

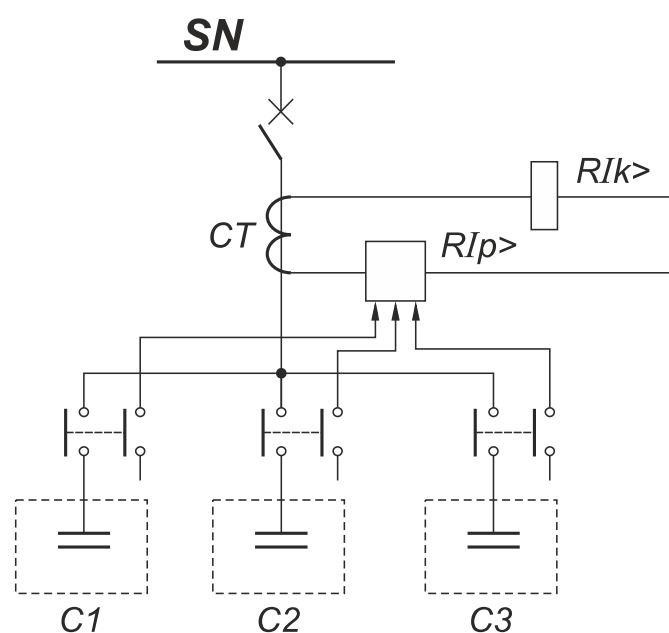
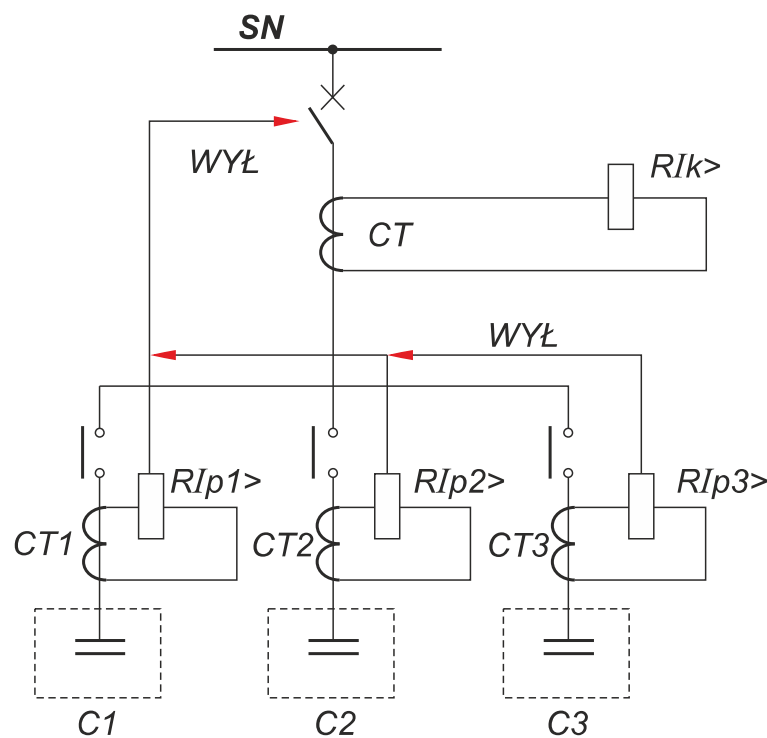
Zwraca się uwagę, że we wzorze (1) należy użyć odpowiednio prądu znamionowego całej baterii lub tylko zabezpieczanego członu. Nastawa zabezpieczenia od przeciążeń (jeśli jest ono zasilane z przekładników prądowych pola) jest zależna od liczby i mocy poszczególnych członów. Zabezpieczenia od przeciążeń mogą być zainstalowane

w poszczególnych członach i oddziaływać na wspólny wyłącznik. Obydwa rozwiązania są pokazane na rysunkach 3 i 4.

Na rysunku 3 przedstawiono zabezpieczenie oddzielne dla poszczególnych członów. Zadziałanie jednego z zabezpieczeń powoduje otwarcie wyłącznika pola. Taki układ wymaga zainstalowania dodatkowych przekładników prądowych i przekaźników nadprądowych zwłoczących.

Rys. 3. Zabezpieczenie od przeciążeń oparte na pomiarze prądu w poszczególnych członach baterii (symbol kondensatora w prostokącie oznacza podwójną gwiazdę kondensatorów)

Fig. 3. Protection against overloads based on the measurement of current in each step of the capacitor bank (capacitor symbol in a rectangle indicates double Y-system)



Rys. 4. Zabezpieczenie od przeciążeń oparte na wspólnym przekładniku; symbol kondensatora w prostokącie oznacza układ podwójnej gwiazdy kondensatorów

Fig. 4. Overload protection based on a common current transformer.(symbol in a rectangle indicates double Y-system)

Na rysunku 4 stany łączników poszczególnych członów przekazywane są do zabezpieczenia pola. W zależności od konfiguracji zabezpieczenie zmienia wartość nastawy prądowej. Takie rozwiązanie powinno być dostępne do końca bieżącego roku w jednej z polskich firm. Można się zastanawiać, czy nie wystąpi sytuacja, że jeden człon będzie niedociążony, a inny przeciążony. Jest to bardzo mało prawdopodobne, bo przeciążenie kondensatorów przeważnie jest spowodowane wyższymi harmonicznymi napięcia i wszystkie człony są obciążane w tym samym stopniu.

5. ZABEZPIECZENIE NADPRĄDOWE ZWŁOCZNE

Pewne wątpliwości może budzić sama nazwa zabezpieczenia: „zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne”, ponieważ według IRIESD zabezpieczenia nadprądowe o opóźnieniu czasowym mniejszym niż 0,4 s zalicza do zwarciovych. Jednakże nie jest spełniony drugi warunek definicji, mianowicie taki, że „nastawa prądowa wynika z oceny prądów zwarciovych w otoczeniu miejsca jego zainstalowania z pominięciem wpływu prądów roboczych”. Nazwa taka będzie używana zamiast „nadprądowe bezzwłoczne”.

Dla zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego, które na rysunku 2 jest oznaczone jako $Rlk >$, nastawę można dobierać ze wzoru:

$$I_{nast} \geq \frac{k_b I_n}{k_p g_i}, \quad (2)$$

a czułość sprawdzać według zależności:

$$k_c = \frac{I_{kmin}}{I_{nast} g_i}, \quad (3)$$

w których:

I_n – prąd znamionowy baterii,

I_{kmin} – najmniejszy prąd zwarcia dwufazowego na zaciskach baterii,

k_b – współczynnik bezpieczeństwa, który należy przyjąć w granicach $1,4 \div 2,0$, ale co najmniej o 0,1 więcej niż iloczyn trzech współczynników we wzorze (1),

k_p – współczynnik powrotu dla zastosowanego przełącznika/zabezpieczenia (wskazane zastosowanie przełączników o możliwie dużym współczynniku powrotu rzędu $0,98 - 0,99$),

k_c – współczynnik czułości, który powinien mieć wartość nie mniejszą niż 1,5, ale lepiej, aby była to wartość co najmniej 2,0.

Bezpiecznym rozwiązaniem jest także zastosowanie zasady, że nastawa zabezpieczenia od skutków zwarc międzyfazowych ma być co najmniej o 10% większa od nastawy zabezpieczenia od przeciążeń.

Maksymalne opóźnienie czasowe wynika z zachowania selektywności zabezpieczeń w rozdzielni SN i powinno być przynajmniej o Δt mniejsze od nastaw zabezpieczeń nadprądowych zwłocznych w polu łącznika i polu transformatora zasilającego. Δt jest to najmniejszy czas stopniowania nastaw czasowych zabezpieczeń i wynosi przeważnie 0,3 s. Z tego warunku uzyska się czasy około 1,0 s, takie jak w polach liniowych – jest to za dużo dla zwarc w tak specyficznym urządzeniu jak bateria kondensatorów, przyłączonym bezpośrednio do szyn zbiorczych.

Nastawione opóźnienie tego zabezpieczenia nie powinno być także krótsze niż $0,08 \div 0,1$ s ze względu na stan nieustalony pojawiający się podczas załączania baterii, który według badań firmy OLMEX trwa od 1 do 4 okresów. Proponuje się nastawę w granicach $0,1 \div 0,15$ s. Jeśli podczas próbnych załączeń lub eksploatacji będą występowały zjawiska zbędne, należy przeanalizować zapisy rejestratora i dobrać według nich czas odpowiednio większy.

6. ZABEZPIECZENIA NADNAPIĘCIOWE

Wskazane jest, aby bateria kondensatorów miała cztery stopnie zabezpieczenia nadnapięciowego. Powinny być one oparte na następujących dopuszczalnych wartościach napięcia oraz czasu jego trwania [8, 9]:

a) $1,3 U_n - 1$ min; b) $1,2 U_n - 5$ min; c) $1,15 U_n - 0,5$ h/dobę; d) $1,1 U_n - 8$ h/dobę,

przy czym:

U_n – napięcie nominalne sieci, np. 15 kV, 20 kV.

Powyższe zależności nie precyzują, czy to dotyczy warunku:

- wszystkie napięcia międzyprzewodowe muszą być przekroczone, aby liczyć czas,
- jedno z napięć międzyprzewodowych musi być przekroczone, aby zliczać czas,
- dla każdego napięcia międzyprzewodowego należy zliczać czas oddzielnie.

Ponieważ napięcia przewodowe w sieci są w miarę symetryczne, wydaje się, że należy zliczać jeden wspólny czas, jeśli jedno z napięć przewodowych przekracza wartość dopuszczalną. Na polskim rynku raczej obecnie nie ma zabezpieczenia pozwalającego na realizację podanych czterech warunków. Z tego powodu na rysunku 2 schematycznie oznaczono je jako $RUI>$ oraz $RU2>$. Oczywisty jest dobór nastaw dla poszczególnych stopni:

$$a) \quad U_{nast} \geq \frac{1,3U_n}{g_u}, \quad (4a)$$

$$t_{nast} = 60 \text{ s},$$

$$b) \quad U_{nast} \geq \frac{1,2U_n}{g_u}, \quad (4b)$$

$$t_{nast} = 300 \text{ s},$$

$$c) \quad U_{nast} \geq \frac{1,15U_n}{g_u}, \quad (4c)$$

$$t_{nast} = 0,5 \text{ h na } 24 \text{ h},$$

$$d) \quad U_{nast} \geq \frac{1,1U_n}{g_u}. \quad (4d)$$

$$t_{nast} = 8 \text{ h na } 24 \text{ h}$$

We wzorach pominięto współczynnik powrotu, ale jego wartości we współczesnych rozwiązaniach są tak zbliżone do 1, że nie mają większego znaczenia.

Dwa pierwsze stopnie mogą być tradycyjnymi zabezpieczeniami nadnapięciowymi zwłocznymi. Natomiast dwa następne wymagają specjalnych algorytmów zliczających czas przekroczenia dopuszczalnej wartości napięcia w ciągu 24 godzin. Wydaje się, że okno pomiarowe powinno przesunąć się w czasie, a nie zliczać tylko w ciągu doby od godz. 0⁰⁰ do 0⁰⁰ następnego dnia.

Natomiast dwa następne człony powinny być specjalnymi do tego celu zabezpieczeniami, których sposób działania nie mieści się w obecnych definicjach z zakresu EAZ. Producenci powinni dostosować się do tego wymagania wynikającego z normy.

Powstaje problem, jak nastawić tradycyjne zabezpieczenie, które ma tylko jeden lub dwa stopnie nadnapięciowe zwłoczne. Trzeba zatem tak dobrać ich nastawy, aby były spełnione wszystkie wymagania.

Proponuje się, że jeśli zastosowane zabezpieczenie ma tylko jeden stopień nadnapięciowy, to:

- stosuje się wzór (4d), a opóźnienie czasowe wynosi 60 s.

Jeśli zabezpieczenie ma dwa stopnie, to:

- stosuje się wzór (4d), a opóźnienie czasowe wynosi 300 s,
- stosuje się wzór z punktu (4c), a opóźnienie czasowe wynosi 60 s.

7. ZABEZPIECZENIE PODNAPIĘCIOWE

Bateria jest odporna na pracę przy obniżonym napięciu. Przyczyną stosowania zabezpieczenia są duże zapady napięcia (poniżej 10% napięcia nominalnego sieci) i krótkotrwałe przerwy występujące na szynach zbiorczych spowodowane zwarciami bliskimi w sieci SN, działaniem automatyki SZR czy działaniem automatyki SPZ w linii 110 kV zasilającej stację. Z tego powodu w publikacji [4] pojawia się wymaganie konieczności wyłączenia baterii przy każdym zadziałaniu wyłącznika po stronie SN transformatora 110 kV/SN. Groźne nie jest samo obniżenie napięcia, ale jego wartość chwilowa w momencie powrotu do wartości bliskiej nominalnej. Bateria może nie zdążyć się rozładować (pomimo że jest połączona w tym czasie przynajmniej z transformatorem potrzeb własnych, a przeważnie liniami SN) i następuje podanie napięcia przemiennego na baterię kondensatorów nie całkowicie rozładowaną,

mającą na zaciskach napięcie szczytkowe. Normy [8, 9] ostrzegają, że napięcie szczytkowe w chwili załączenia nie powinno przekraczać 10% napięcia znamionowego.

Zabezpieczenie to jest w pewnym sensie rezerwowe, ponieważ jednostka kondensatorowa jest wyposażona w rezystory rozładowcze, a inne urządzenia przyłączone do szyn zbiorczych pomagają także w jej rozładowaniu. Nastaw tego zabezpieczenia nie da się w żaden sposób obliczyć, ale można przeanalizować. Dobrze, aby bateria nie wyłączała się zbyt często, czyli przy każdym zwarcu międzyfazowym w sieci współpracującej, a powinno być bardzo szybkie – nie powinno reagować tylko przy stanach nieustalonych podczas załączeń linii. Stąd proponuje się działanie bezzwłoczne oraz nastawę napięcia:

$$U_{nast} = \frac{0,1U_n}{g_u} \quad (5)$$

8. ZABEZPIECZENIE OD SKUTKÓW ZWARĆ WEWNĘTRZNYCH BATERII

Zabezpieczenie od skutków zwarć wewnętrznych jest najczulszym i jednym z najważniejszych zabezpieczeń baterii kondensatorów, ponieważ wykrywa stan awaryjny w początkowym stadium, chroniąc baterię oraz sieć przed wystąpieniem zwarcia groźniejszego oraz jego negatywnymi skutkami.

Zwarcie wewnętrzne jednej zwijki zaznaczono na rysunku 1 w pierwszej od góry grupie kondensatorów. Zabezpieczenie od skutków takich zwarć przerwie proces zwierania kolejnych zwijek jednostki dotkniętej zakłóceniem i zapobiegnie rozerwaniu obudowy jednostki kondensatorowej oraz rozszerzeniu się awarii na inne jednostki pracujące w tym samym członie, tak we własnym układzie gwiazdowym jak i sąsiednim.

Zwarcie wewnętrzne polega na przebiciu dielektryka w zwijce kondensatorowej. Zwarcie zwijki jest w pierwszym jej stadium zwarcie łukowym. Łuk zamyka obwód RLC, w którym występuje rozładowanie energii elektrycznej nagromadzonej w zwijkach równolegle pracujących ze zwijką zwartą. Rozładowanie ma charakter oscylacyjny o dużej częstotliwości (rzędu kilku kiloherców), przy której niejednokrotnie występują przepięcia niebezpieczne dla zwijek zdrowych. Ciepło wytworzone w miejscu zwarcia powoduje stopniowe zwęglenie dielektryka i nadtopienie folii.

W kondensatorach niewyposażonych w bezpieczniki zwijkowe zwarcie jednej z nich prowadzi zwykle do stopniowego zniszczenia całej jednostki. Powodem tego są termiczne i chemiczne zjawiska występujące w zwartej zwijce oraz zmiana napięciowych warunków pracy zwijek zdrowych. Przez miejsce zwarcia płynie cały prąd jednostki – kilkanaście lub nawet kilkadziesiąt razy większy od prądu znamionowego zwijki. Ciepło wydzielane w miejscu zwarcia powoduje podniesienie temperatury uszkodzonej zwijki. Wzrasta również temperatura sąsiednich zwijek, które wskutek tego są narażone na przyspieszone starzenie dielektryka i w końcu następuje ich uszkodzenie.

Zwarcie jednej zwijki bocznikuje całą grupę zwijek pracujących równolegle. Powoduje to zmianę rozkładu napięcia na szeregowo połączonych grupach wewnątrz jednostki. Zwijki zdrowe pracują wtedy przy napięciu najczęściej przekraczającym 110% ich napięcia znamionowego, co znacznie zwiększa prawdopodobieństwo dalszych uszkodzeń wtórnych. Zwarcie jednej grupy zwijek w jednostce zbudowanej z kilku grup zwijek połączonych szeregowo powoduje zwiększenie pojemności jednostki. Tym samym rośnie również moc jednostki i wydzielane straty mocy czynnej. Prowadzi to do zwiększenia temperatury jednostki i skrócenia trwałości zwijek zdrowych. Zrozumiałe jest, że wszystkie wymienione czynniki działające równocześnie prowadzą do kolejnych zwarć w dalszych zwijkach aż do pełnego zwarcia jednostki. Powstaje przy tym duża ilość gazów, które podnoszą ciśnienie wewnątrz obudowy kondensatora, mogąc doprowadzić do jego rozerwania. Zadaniem zabezpieczenia jest ograniczenie skutków takiego zwarcia przez możliwie wczesne jego wykrycie i wyłączenie całej baterii.

Jest wiele rozwiązań tego zabezpieczenia – prawdopodobnie wszystkie badają zjawisko wystąpienia asymetrii pojemnościowej, ale różne są kryteria jej wykrywania. W Polsce rozpowszechniło się rozwiązanie polegające na badaniu wartości prądu w połączeniu pomiędzy punktami neutralnymi dwóch układów gwiazdowych kondensatorów. Układ ten pokazano na rysunku 2, a zabezpieczenie nadprądowe ma oznaczenie $RI_g>$. Jeśli

tak jak na rysunku 2 bateria składa się z kilku grup kondensatorów, każda z nich ma własne zabezpieczenie od skutków zwarcia wewnętrznych. W stanie bezzakłóceń w gałęzi pomiędzy punktami neutralnymi gwiazd i idealnymi jednostkami kondensatorowymi nie płynie żaden prąd. W przypadku zwarcia jednej lub więcej zwijek w gałęzi poprzecznej pojawia się pewien prąd, który można obliczyć, chociaż teorie dotyczące tego zagadnienia są złożone.

Przeszkodą dla określenia przejrzystego sposobu obliczenia nastawy tego zabezpieczenia jest prąd uchybowy, który pojawia się w gałęzi poprzecznej w czasie pracy bezzakłóceń, wynikający z jakości wykonania poszczególnych zwijek. Prąd ten podczas zakłóceń wewnętrznych sumuje się z prądem uchybowym wywołanym asymetrią pojemnościową i w najbardziej niekorzystnym przypadku dla zabezpieczenia może się od niego możliwie algebraicznie odejmować zmniejszając czułość. Można stąd sformułować dwie wstępne zależności odnośnie do nastawy prądu dla tego zabezpieczenia:

$$I_{gnast} \geq k_b \frac{I_{gu}}{\mathcal{G}_i}, \quad (6)$$

$$I_{gnast} < \frac{I_{gk} - I_{gu}}{k_c \mathcal{G}_i}, \quad (7)$$

w których:

I_{gnast} – nastawa prądu zabezpieczenia,

I_{gu} – prąd uchybowy w gałęzi poprzecznej,

I_{gk} – prąd w gałęzi poprzecznej wywołany uszkodzeniem wewnętrznym,

k_b – współczynnik bezpieczeństwa (można przyjąć 2),

k_c – współczynnik czułości (można przyjąć 1,5),

$\mathcal{G}_i$ – przekładnia przekładnika prądowego w gałęzi poprzecznej (zaleca się stosowanie przekładnika o przekładni 1).

Zaleca się, aby wartość nastawy była możliwie bliska wartości obliczonej ze wzoru (6).

W publikacjach [5, 6] prąd uchybowy I_{gu} był określany z zależności:

- jeśli względna różnica pojemności poszczególnych faz jest mniejsza od 0,5%:

$$I_{gu} = 1,45 \frac{Q_{nc}}{U_r}, \quad (8a)$$

- w innych przypadkach:

$$I_{gu} = 2,9 \frac{Q_n}{U_n}, \quad (8b)$$

gdzie:

I_{gu} – prąd uchybowy w gałęzi poprzecznej [A],

Q_{nc} – moc znamionowa jednego członu baterii [Mvar],

U_r – napięcie znamionowe międzyprzewodowe baterii [kV].

Zwraca się uwagę, że jeśli bateria ma jeden człon, to prąd znamionowy baterii jest równy prądowi znamionowemu jednego członu. Jeśli bateria jest wyposażona w więcej niż jeden człon, należy te dwa pojęcia rozróżnić.

Wzory (8a) i (8b) można sprowadzić do postaci:

$$I_{gu} = 2,48 \cdot I_{nc} \cdot 10^{-3}, \quad (9a)$$

lub

$$I_{gu} = 4,96 \cdot I_{nc} \cdot 10^{-3}, \quad (9b)$$

gdzie: I_{nc} – prąd znamionowy jednego członu baterii.

Ponieważ współczesne kondensatory są dobrej jakości, należy przyjmować raczej zależności (8a) i (9a).

Prąd w połączeniu punktów gwiazdowych baterii kondensatorów spowodowany zwarcie b zwijek (oznacza to wyłączenie całej grupy równoległych zwijek) oblicza się według wzoru:

$$I_{gk} = I_n \frac{3M}{6M \frac{n-b}{b} - 1} \quad (10)$$

gdzie:

M – liczba jednostek kondensatorowych pracujących równolegle w jednym członie,

n – liczba grup zwijek łączonych szeregowo,

b – liczba zwartych zwijek, przyjmuje się początkowo, że $b = 1$ [5, 6].

Jeśli wartość współczynnika czułości jest niezadowalająca, można przyjąć, że $b = 2$. Z punktu widzenia zabezpieczenia to nic nie daje, tylko oznacza, że zabezpieczenie zadziała dopiero po uszkodzeniu kolejnej zwijki w innej grupie. Lepiej zmniejszyć prąd uchybowy I_{gu} , ale trzeba go sprawdzić za pomocą pomiaru.

Opóźnienie czasowe należy przyjmować w granicach $0,1 \div 0,2$ s.

Warto zwrócić uwagę na pewną wadę tego zabezpieczenia. Połączenie pomiędzy punktami gwiazdowymi obu układów powoduje, że potencjał z uszkodzonego układu gwiazdowego przenosi się na „zdrowy” układ gwiazdowy. Przy przebicciu całej jednostki w punkcie gwiazdowym „zdrówego” układu pojawi się napięcie fazowe względem ziemi, a na dwóch jednostkach pojawi się napięcie międzyprzewodowe, które narazi je na uszkodzenie. To zjawisko będzie trwało bardzo krótko – do zadziałania jednego z zabezpieczeń i otwarcia wyłącznika – jednak może być groźne.

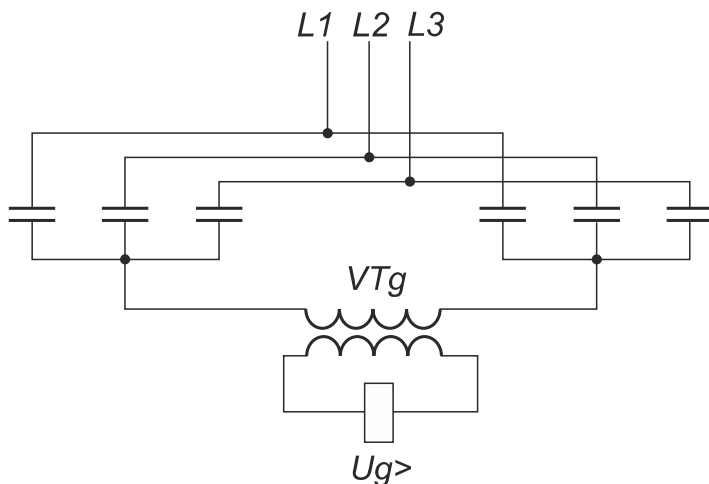
Z tego powodu warto rozpatrzyć propozycję autorów, aby zamiast tego układu zastosować schemat pokazany na rysunku 5. Przedstawione rozwiązanie z przekładnikiem napięciowym było do tej pory odrzucane, ponieważ przekładniki statyczne analogowe i elektromechaniczne miały za małe zakresy pomiarowe. Przy obecnych układach cyfrowych można uzyskać zakresy pomiarowe od dziesiątych części wolta do 200 V. Przy uszkodzeniu zwijek pomiędzy gwiazdami pojawi się napięcie:

$$U_g = U_L \frac{1}{3M \frac{n-b}{n} + 1} \quad (11)$$

gdzie:

U_g – napięcie pomiędzy gwiazdami,

U_L – aktualne napięcie fazowe w sieci (zakłada się symetrię napięć).



Rys. 5. Zabezpieczenie oparte na pomiarze napięcia pomiędzy punktami neutralnymi gwiazd
Fig. 5. Protection based on the voltage measurement between neutral points of the star systems

Na tej podstawie można proponować, aby nastawa zabezpieczenia spełniała warunek:

$$U_{gnast} \cong \frac{1,1U_n}{\sqrt{3} \cdot g_u \cdot k_c} \cdot \frac{1}{3M \frac{n-b}{n} + 1} \quad (12)$$

gdzie:

U_{gnast} – nastawa napięciowa zabezpieczenia w gałęzi łączącej punkty gwiazdowe,

U_n – napięcie nominalne sieci,

k_c – współczynnik czułości (wystarczająca jest wartość 1,2),

g_u – przekładnia przekładnika napięciowego.

Znamionowe napięcie pierwotne przekładnika powinno być równe napięciu fazowemu sieci. Istnieje możliwość, że w przypadku pełnego zwarcia jednostek kondensatorowych w różnych fazach obu gwiazd napięcie na przekładniku osiągnie wartość napięcia międzyprzewodowego sieci, ale jest to bardzo mało prawdopodobne.

Powinien jeszcze być spełniony warunek

$$U_{gnast} = k_b \cdot U_{gu} , \quad (13)$$

gdzie:

U_{gu} – napięcie uchybowe pomiędzy gwiazdami (można określić je tylko na drodze pomiarowej).

Należy się spodziewać, że napięcie pomiędzy punktami gwiazdowymi przy zwarcu jednej zwijki będzie rzędu kilkudziesięciu woltów, czyli nastawa zabezpieczenia po uwzględnieniu przekładni może być na poziomie tylko $(0,5 \div 1,0) V$.

9. ZABEZPIECZENIA ZIEMNOZWARCIOWE

Do tej pory zabezpieczenia ziemnozwarciowe stosowano zwyczajowo tylko w sieci o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor, w której prąd zwarcia doziemnego ma znacznie większe wartości niż w sieciach o izolowanym punkcie neutralnym czy w sieciach skompensowanych. Mogło to być zabezpieczenie zerowoprądowe, oznaczone na rysunku 2 jako *RIO*>. Ponieważ pojemnościowy prąd doziemny za filtrem składowej zerowej tego pola jest minimalny, zabezpieczenie można nastawić na bardzo mały prąd wynikający tylko z błędów zastosowanych filtrów. Mogą to być wartości:

$$I_{0nast} \geq k_b \Delta I_{0\mu} , \quad (14)$$

gdzie:

k_b – współczynnik bezpieczeństwa (rzędu 2–4),

$\Delta I_{0\mu}$ – błąd filtru składowej zerowej prądu, ze względu na spodziewany duży zapas czułości można przyjmować:

- 50 mA – dla układu Holmgreena przy przekładnikach o znamionowym prądzie wtórnym 5 A,
- 20 mA – dla układu Ferrantiego oraz dla układu Holmgreena przy przekładnikach o znamionowym prądzie wtórnym 1 A.

Czułość sprawdza się według wzoru:

$$k_c = \frac{\frac{\sqrt{I_{CS}^2 + I_R^2}}{g_{i0}} - \Delta I_{0\mu}}{I_{0nast}} , \quad (15)$$

gdzie:

I_{CS} – pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego sieci (tylko sekcji, do której przyłączona jest bateria),

I_R – znamionowy prąd ziemnozwarciowy rezystora uziemiającego,

k_c – współczynnik czułości (powinien wynosić co najmniej 2,0).

Z doświadczenia wiadomo, że współczynnik czułości przekroczy wartość 10, stąd nastawę otrzymaną ze wzoru (14) można zwiększyć jeszcze 2 razy, aby na pewno uniknąć zbędnych zadziałań podczas stanów nieustalonych, szczególnie załączeń baterii.

Jeśli połączenie pomiędzy baterią kondensatorów a polem rozdzielni ma długość większą niż 50 m, to należy dobór nastaw zabezpieczeń przeprowadzić jak dla pola liniowego. Odpowiednie wzory można znaleźć na stronie internetowej [10].

Do tej pory nie instaluje się raczej zabezpieczeń ziemnozwarciowych baterii kondensatorów w sieciach o izolowanym punkcie neutralnym i sieciach skompensowanych. Ze względu na niewielką cenę tych zabezpieczeń (potrzebny jest jednak filtr składowej zerowej prądu) stanowiących fragment algorytmu warto je wprowadzić szczególnie dla ochrony kabla łączącego baterię z rozdzielnią, bo tak to się współcześnie realizuje.

W sieci o izolowanym punkcie neutralnym można zastosować zabezpieczenie zerowoprądowe, jego nastawę dobrać według wzoru (14) i sprawdzić czułość według wzoru:

$$k_c = \frac{\frac{I_{CS}}{g_{i0}} - \Delta I_{0\mu}}{I_{0nast}}, \quad (16)$$

oraz ocenić – podobnie jak dla sieci o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor.

Można także zastosować zabezpieczenie admitancyjne $Y_{0>}$, które jest mniej czułe na stany nieustalone w przebiegach prądu. Nastawę dobiera się wg wzorów:

$$Y_{0nast} \geq k_b \frac{\Delta I_{0\mu}}{U_{0nast}}, \quad (17)$$

$$k_c = \frac{I_{CS}}{U_{0max} g_{i0} Y_{0nast}}, \quad (18)$$

gdzie:

k_b – współczynnik bezpieczeństwa (rzędu 2),

U_{0nast} – nastawa członu rozruchowego zabezpieczenia zerowonapięciowego (zaleca się wartość 10 V),

U_{0max} – największe napięcie na wyjściu z filtra składowej zerowej napięcia (100 V).

W sieci skompensowanej wyposażonej w automatykę wymuszania składowej czynnej (AWSZ) należy użyć tylko kryterium konduktancyjnego i nastawić je wg wzoru:

$$G_{0nast} \geq k_b \frac{\Delta I_{0\mu}}{U_{0nast}}, \quad (19)$$

$$G_{0nast} < \frac{I_{AWSZ}}{k_c \cdot g_{i0} \cdot U_{0nast}}, \quad (20)$$

gdzie:

I_{AWSZ} – prąd czynny wymuszany w sieci (po stronie pierwotnej) (jeśli brakuje danych – przyjąć 20 A),

k_c – współczynnik czułości (przyjąć 1,5).

Zaleca się nastawę w pobliżu średniej wartości obliczonej z obu podanych zależności (19 i 20).

10. ZABEZPIECZENIE PRZED ZAŁĄCZENIEM NIEROZŁADOWANEJ BATERII

Po każdym wyłączeniu (niezależnie od przyczyny) ponowne załączenie może nastąpić po czasie $t_{b\text{ zab}}$, który zaleca się przyjmować jako 10 min, przy czym producent baterii może określić inną wartość. Aby sprostać temu wymaganiu, wystarczy wprowadzić w sterownik pola odpowiedni algorytm logiczny.

11. WNIOSKI

Prawidłowo dobrane zabezpieczenia baterii kondensatorów przyczyniają się do wydłużenia czasu jej eksploatacji i ochrony jednostek sąsiadujących z uszkodzoną baterią.

Artykuł dotyczy baterii zbudowanych na jednostkach kondensatorowych niewyposażonych w bezpieczniki wewnętrzne, ale to ograniczenie dotyczy tylko zabezpieczenia od skutków zwarć wewnętrznych.

Oprócz zabezpieczeń wymienionych w instrukcji [4] zaleca się stosowanie zabezpieczeń podnapięciowych i blokadę przed załączeniem na zbyt duże napięcie szczytowe. Wskazane są także czterostopniowe zabezpieczenia nadnapięciowe w specyficznym wykonaniu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Dębek, M. Iwanicki: Wymagania projektowe, dobór oraz sposoby zabezpieczeń dla układów kompensacji w sieciach dystrybucyjnych i przesyłowych zgodnie z normą PN-EN-60871-1. Materiały konferencji naukowo-technicznej: Problematyka mocy biernej w sieciach dystrybucyjnych i przesyłowych. Wisła, 24–25 października 2012.
- [2] J. Hoppeł, J. Lorenc: Jak dobierać nastawy zabezpieczeń w polach funkcyjnych rozdzielni średniego napięcia. *Automatyka Elektroenergetyczna*, 2003, nr 3, s. 35–39.
- [3] J. Lorenc, K. Marszałkiewicz, J. Andruszkiewicz: Nowe spojrzenie na zagadnienie zabezpieczania baterii kondensatorów SN. *Automatyka Elektroenergetyczna* 1995, nr 3, s. 17–19.
- [4] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. ENEA Operator, 1 stycznia 2014.
- [5] Z. Nartowski: Baterie kondensatorów do kompensacji mocy biernej. *WNT*, Warszawa 1967.
- [6] S. Wyrzykowska: Pomiary i automatyka w elektroenergetycznych sieciach przemysłowych. Projektowanie. *WNT*, Warszawa 1988.
- [7] J. Żydanowicz: Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, t. I–III, *WNT*, Warszawa 1979, 1985, 1987.
- [8] PN-EN 60781-1:2014-12: Kondensatory do równoległej kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu znamionowym powyżej 1 000 V. Część 1: Postanowienia ogólne. Wersja angielska.
- [9] PN-EN 60871-1:2008. Kondensatory do równoległej kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu znamionowym powyżej 1000 V. Część 1: Wymagania ogólne.
- [10] www.alpines.pl.

otrzymano / received: 20.08.2015 przyjęto do publikacji / accepted: 15.12.2015