

## Transformatory wielkiej mocy pracujące w trybie quasi-dławika rozruchowego w liniach 220 kV

**Streszczenie.** Jednym z elementów odbudowy systemu elektroenergetycznego w przypadku blackoutu jest wybór toru rozruchowego zapewniającego odpowiednie parametry układu m.in. napięcia na elementach. Podstawowym problemem jest tutaj wzrost napięcia na elementach toru związany z wystąpieniem w torze mocy biernych pojemnościowych linii. W artykule, na podstawie obliczeń dla toru między EW Dychów, a Elektrownią Dolna Odra, zostanie przedstawiona metoda kompensacji z użyciem transformatorów 220 kV połączonych równolegle.

**Abstract.** One of the elements of the power system reconstruction in the case of a blackout is the selection of a start-up track that ensures appropriate parameters of the system, including voltage on elements. The main problem here is the increase in the voltage on the track elements associated with the occurrence of passive capacitive lines in the track. In the article, based on calculations for the track between EW Dychów and Dolna Odra Power Plant, the compensation method will be presented using 220 kV transformers connected in parallel. **High power transformers working in quasi-reactor mode in 220 kV lines.**

**Słowa kluczowe:** awarie katastrofalne, odbudowa systemu elektroenergetycznego, moc bierna pojemnościowa linii, kompensacja mocy biernej.

**Keywords:** catastrophic failures, reconstruction of the power system, capacitive reactive power line, reactive power compensation.

### Wstęp

W sytuacjach awarii katastrofalnych podstawowym zadaniem elementów KSE jest odbudowa systemu elektroenergetycznego po przez uruchomienie elektrowni systemowych. Rozruch odbywa się po przez podanie napięcia przez zewnętrzne źródło. Podstawowymi źródłami rozruchowymi są elektrownie wodne, szczytowo-pompowe lub przepływowo. Charakteryzują się one dużą elastycznością pracy oraz możliwościami samostartu.

Odbudowa systemu elektroenergetycznego odbywa się po przez wyznaczenie ciągu rozruchowego, czyli drogi, którą moc i napięcie mają zostać przesyłane z elektrowni rozruchowej do elektrowni systemowej. Analiza wyboru ciągu rozruchowego obejmuje takie zagadnienia jak:

- układ sieci,
- napięcie znamionowe poszczególnych odcinków toru.
- możliwości manewrowe aparatury łączeniowej,
- wyposażenie samoobsługowych stacji transformatorowo-rozdziałczych w systemy komputerowe zdalnego sterowania,
- Dla stacji bez zdalnego sterowania minimalny czas w jakim obsługa może przybyć na stację.

Oprócz wyżej wymienionych zagadnień tor rozruchowy musi spełniać szereg wymagań bliżej opisanych w punkcie Wybór toru rozruchowego dla elektrowni systemowej.

### Problem odbudowy systemu w przypadku zdarzenia katastrofalnego

Krajową podstawą prawną w kwestii odbudowy systemu elektroenergetycznego jest Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej [1]. Zgodnie z jej wytycznymi uczestnicy rynku posiadający jednostki wytwórcze, które w krajowym planie przewidziane są jako elementy rozruchowe mają obowiązek utrzymać określone wymagania i sporządzić dla Operatora Systemu Przesyłowego instrukcję utrzymania pracy co najmniej jednej jednostki wytwórczej w przypadku zerwania połączenia z systemem lub awarii systemowej.

W celu współpracy elektrownie powinny posiadać zdolności do:

- pracy wyspowej,
- pracy w układzie wydzielonym, czyli możliwości do przejścia do stanu pracy na potrzeby własne,
- samostartu.

Wymagania szczegółowe określające powyższe zdolności podzielone są na pięć kategorii:

- I. wymagania techniczne dla jednostek wytwórczych,
- II. wymagania w zakresie zdolności jednostek wytwórczych do pracy wydzielonej i wyspowej,
- III. wymagania w zakresie pracy na potrzeby własne,
- IV. wymagania dla regulatorów turbin jednostek wytwórczych w zakresie obrony i odbudowy KSE,
- V. wymagania dla regulatorów napięć generatorów w zakresie zdolności do obrony i odbudowy KSE.

Zweryfikowanie spełnienia wszystkich wymogów możliwe jest tylko po przez zorganizowanie testów sprawdzających zdolności jednostek wytwórczych do obrony i odbudowy KSE odbywające się na zasadzie testów odbiorowych, okresowych oraz prób systemowych.

W artykule rozpatrywana będzie próba systemowa wykonana pomiędzy elektrownią Dychów a elektrownią Dolna Odra [2].

### Wybór toru rozruchowego dla elektrowni systemowej

Tor rozruchowy musi spełniać określone wymagania:

- Dobór układu rozruchowego musi zapewnić nieprzerwalny proces odbudowy ze względu na maksymalny czas odstawienia bloku po jego awaryjnym wyłączeniu, który wynosi do 3 godzin,
- układ dobiera się tak, aby uzyskać 100 % pewności rozruchu bloku, ponieważ powtórzenie rozruchu może okazać się niemożliwe,
- niezbędna jest minimalizacja punktów regulacji wzdłuż danego toru rozruchowego, w celu zmniejszenia czasu odłączeń i regulacji elementów stacji pośredniczących,
- maksymalne napięcie pracy sieci nie może przekroczyć 120% napięcia znamionowego,
- należy zapewnić zbilansowanie mocy ładowania linii przez elektrownię rozruchową,
- na szynach elektrowni systemowej napięcie minimalne nie może spaść poniżej 70% napięcia znamionowego, gdyż może doprowadzić to do utyku silników,
- w stacjach pośredniczących w rozruchu należy obrać wartości nastaw optymalnie, to znaczy w sposób by praca fazy rozruchu bloku oraz przepływ mocy biernej były stabilne.

Powyższe zasady regulacji torów rozruchowych stanowią podstawę doboru toru rozruchowego dnia

poszczególnych elektrowni systemowych pracujących w systemie elektroenergetycznym. Wybór drogi zależy od przede wszystkim budowy i rozmieszczenia elementów w krajowym systemie.



Rys.1. Wybrane układy przesyłu mocy rozruchowej w obszarze KSE

Zgodnie z rysunkiem 1. W zachodniej części kraju funkcję rozruchową pełni elektrownia wodna Dychów. Elektrownia systemowa, której rozruchu ma dokonać EW jest najczęściej znacznie od niej oddalona. W takim przypadku należy uwzględnić określone wcześniej wymagania oraz parametry elementów wzdłuż wybranego toru rozruchowego.

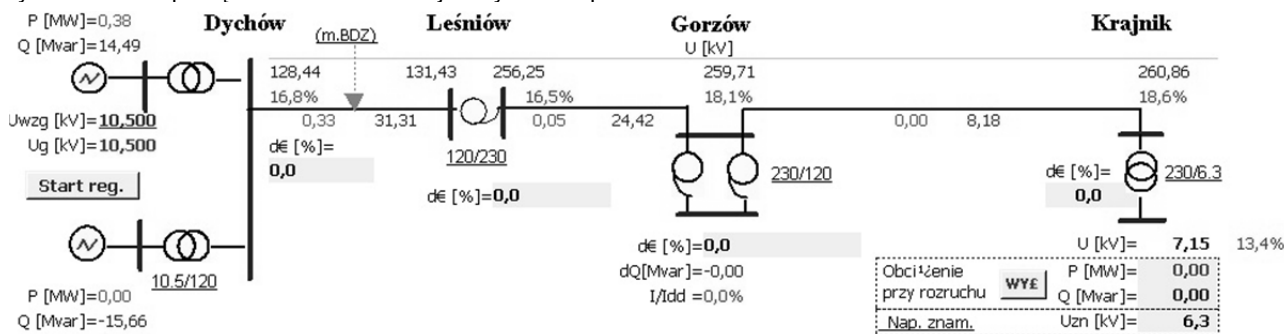
W skład struktury wybranego toru rozruchowego wchodzi następujące elementy:

- źródło rozruchowe – 2 hydrozespoły EW Dychów z agregatem prądotwórczym 200 kW,
- 2 linie 110 kV o długości 23,4 km,
- 2 linie 220 kV o długości 182,2 km,
- stacja Leśniów (LSN),
- stacja Gorzów (GOR),
- stacja Krajnik (KRA),
- źródło uruchamiane – blok energetyczny elektrowni Dolna Odra.

### Kompensacja mocy biernej pojemnościowej linii

Podstawowym problemem doboru odpowiedniego toru rozruchowego są warunki napięciowe panujące w torze w trakcie różnych faz rozruchu.

Napięcie na elementach toru musi być dopasowane tak, aby umożliwiała pracę w dwóch stanach jałowym oraz pod



Rys.2. Schemat toru rozruchowego wraz z napięciami i rozplywami mocy.

obciążeniem. Zgodnie z założeniami dotyczącymi wyboru toru rozruchowego napięcie w dowolnym punkcie sieci nie może przekroczyć 120% napięcia znamionowego, co wiąże się z nastawami przełączników nadnapięciowych. Ponadto napięcie na szynach elektrowni systemowej, która ma zostać uruchomiona musi być utrzymane powyżej napięcia utyku pomp wody zasilającej, które powodują największe obciążenie, czyli powyżej 70% wartości znamionowej.

Problemy napięciowe w torze rozruchowym mają silny związek z mocą bierną pojemnościową linii wysokiego napięcia. W rozpatrywanym ciągu moc rozruchowa bierna wynikająca głównie z pojemności linii 220 kV może osiągać wartość z zakresu 20-28 Mvarów. Jest to związane z jednostkową wartością pojemności linii 220 kV przyjmowaną jako wartość od 10 do 16 Mvarów na 100 km [3].

Ze względu na powyżej opisane problemy odbudowy systemu z wykorzystaniem takich torów rozruchowych należy rozpatrzyć możliwości kompensacji mocy biernej pojemnościowej wpływającej negatywnie na drogę podania mocy do elektrowni systemowej. Potencjalne źródła mocy biernej indukcyjnej mogą stanowić:

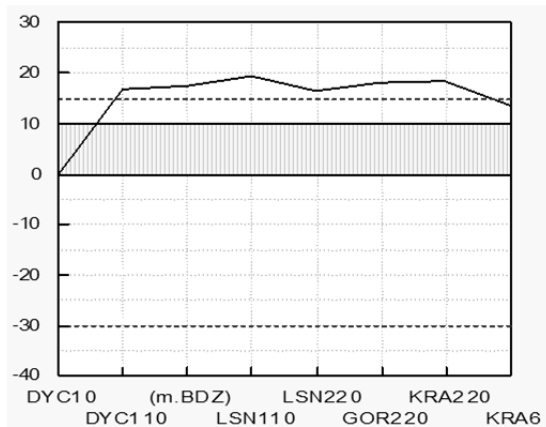
- duże odbiory przemysłowe lub duża liczba małych odbiorów,
- generatory będące źródłem mocy biernej w zakresie od 0 do 20/30 Mvar,
- dławiki kompensacyjne o mocy zakresu od 10 Mvar do nawet 250 Mvar,
- pracujące równoległe transformatory o mocy zakresu od 0 do 20/30 Mvar.

W przypadku kompensacji mocy pojemnościowej w trakcie wykonywania odbudowy systemu wykorzystanie odbiorów jest pomysłem bardzo ryzykownym, głównie ze względu na małe moce wytwórcze elektrowni wodnych. Generator EW Dychów również nie ma możliwości skompensowania pojawiającej się w linii mocy biernej dlatego można rozważyć dwa pozostałe elementy – wykorzystanie dławika kompensacyjnego lub kompensacji przy użyciu równoległe połączonych transformatorów. Uzasadniając wybór tej ostatniej możliwości należy zwrócić uwagę iż w KSE wymagania dotyczące dławików są bardzo restrykcyjne [4]. Ponadto są to urządzenia o wysokiej cenie i wykorzystywane głównie w przypadku rozruchu linii. W przypadku awarii katastrofalnej wykorzystanie istniejącego już układu transformatorów wydaje się opcją jak najbardziej korzystną.

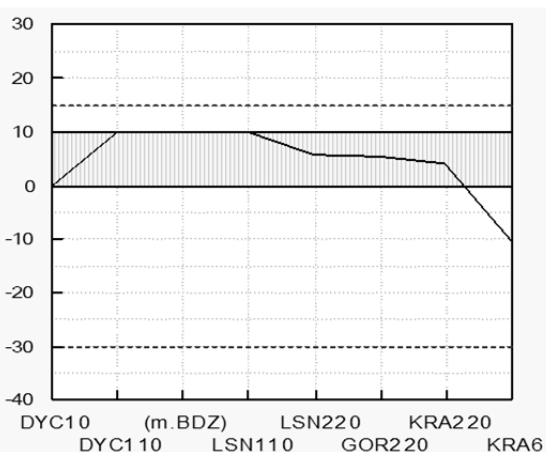
W rozpatrywanym przypadku źródłem mocy biernej indukcyjnej będzie układ dwóch połączonych równoległe autotransformatorów w stacji Gorzów, a pobór mocy indukcyjnej wymuszana będzie po przez rozstrojenie przekładni transformatorów. Obliczenia dla tego przypadku przedstawione zostaną w następnym punkcie.

### Wybór metody kompensacji

Dla schematu toru rozruchowego przedstawionego na rysunku 2. wykonane zostały obliczenia z wykorzystaniem symulacji w programie Lotus dla układu przed kompensacją i po kompensacji.



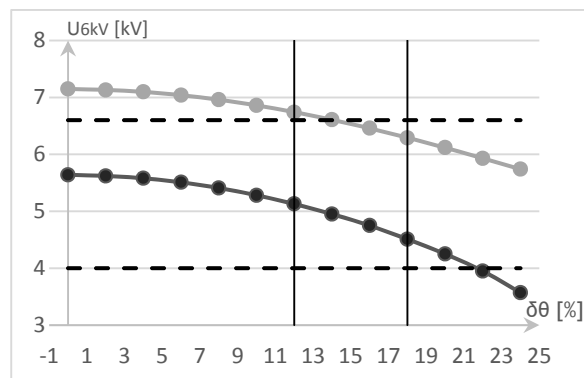
Rys.3. Odchylenie napięcia od wartości znamionowej na biegu jałowym.



Rys.4. Odchylenie napięcia od wartości znamionowej pod obciążeniem.

Przedstawione przebiegi obrazują odchylenie napięcia od wartości znamionowych dla biegu jałowego linii oraz przy obciążeniu. Zakresowana strefa to strefa pobudzenia przekładników nadnapięciowych, natomiast górna linia wyznacza ich zadziałanie. Dla biegu jałowego większość punktów w torze rozruchowym charakteryzuje się przekroczeniami napięcia znamionowego powyżej wartości rozruchowej przekładników. Najistotniejszym z przekroczeń jest przekroczenie napięcia na szynach w Krajniku. Jest to stacja połączona bezpośrednio z uruchamianą elektrownią systemową i zgodnie z warunkami doboru toru rozruchowego napięcie na szynach tej stacji również nie może przyjmować wartości powyżej wartości nastaw przekładników napięciowych. W stacji Krajnik napięcie znamionowe średnie wynosi 6 kV, natomiast przy biegu jałowym napięcie będzie równe 7,1 kV, co nie pozwala na załączenie silników po stronie elektrowni cieplnej (rys. 3.).

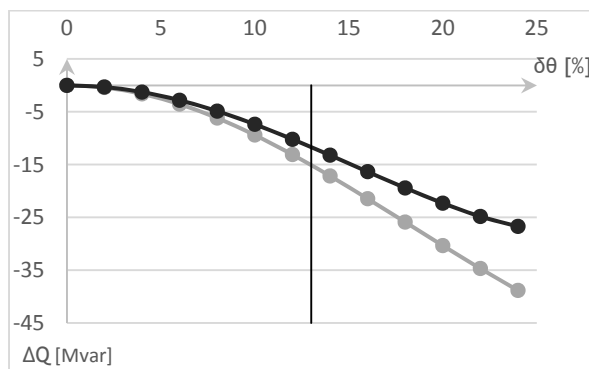
Wykorzystując metodę kompensacji mocy biernej pojemnościowej przy wykorzystaniu transformatorów połączonych szeregowo podstawowym parametrem jest procentowa różnica przekładni między nimi, która wymusza przepływ prądu indukcyjnego powodując, że transformator jest w stanie pracować jako dławik.



Rys.5. Przebieg zależności napięcia na szynach 6 kV w EC Dolna Odra od procentowej różnicy przekładni (kolor szary – bieg jałowy, kolor czarny – obciążenie).

Na rysunku 5. przedstawiono zmiany napięcia w punkcie krańcowym linii, w Krajniku w zależności od procentowej różnicy przekładni  $\delta\theta$ , poziome linie wyznaczają maksymalne i minimalne napięcie pracy, natomiast pionowe – przedział optymalnego rozstrojenia przekładni.

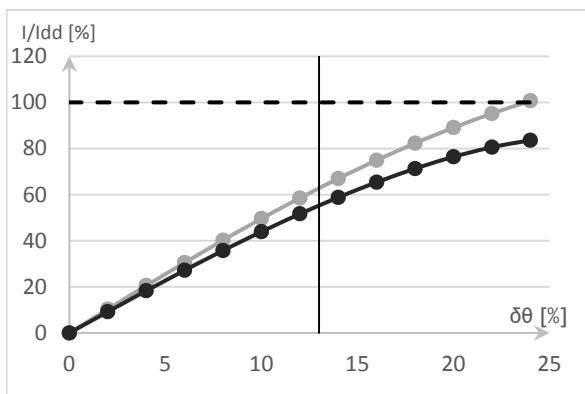
Ze względu na próbę skompensowania mocy biernej pojemnościowej z wykorzystaniem takiego układu istotnym parametrem jest moc bierna indukcyjna jaka może być pobierana przez taki układ. Zgodnie z wybranym zakresem optymalnego procentowego rozstrojenia przekładni transformatorów zapewniającego odpowiednie wartości napięć na szynach 6 kV do dalszej analizy wybrane zostało rozstrojenie na poziomie 13 %.



Rys.6. Przebieg zależności mocy biernej połączonego równoległe układu dwóch autotransformatorów (kolor szary – bieg jałowy, kolor czarny – obciążenie).

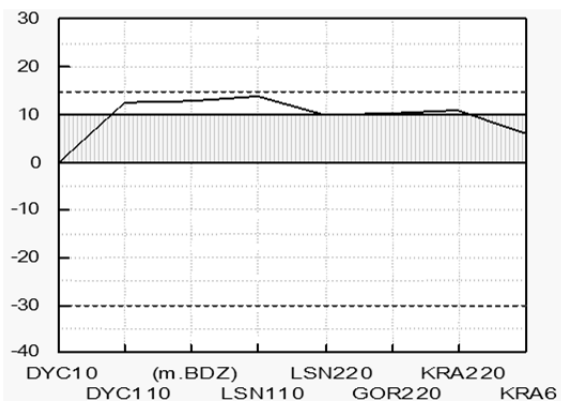
Na rysunku 6. przedstawiono porównanie mocy przy biegu jałowym oraz obciążeniu i dla wybranej różnicy przekładni moc przy biegu jałowym jest równa 15 Mvarów, zaś przy obciążeniu nieznacznie dla układu spada i wynosi 13 Mvarów. Biorąc pod uwagę długość linii przesyłowej łączącej elektrownie rozruchową z elektrownią systemową i możliwości hydrogeneratorów w EW Dychów wykorzystując tę metodę można zbilansować większość mocy pojemnościowej linii 220 kV.

Nie można oczywiście zapomnieć o istotnym wpływie tego rodzaju pracy na zainstalowane w stacji Gorzów transformatory. Znając parametry podstawowe tych transformatorów oraz maksymalną możliwą obciążalność prądową można zilustrować przebieg procentowego obciążenia transformatorów w funkcji różnicy przekładni  $\delta\theta$ .

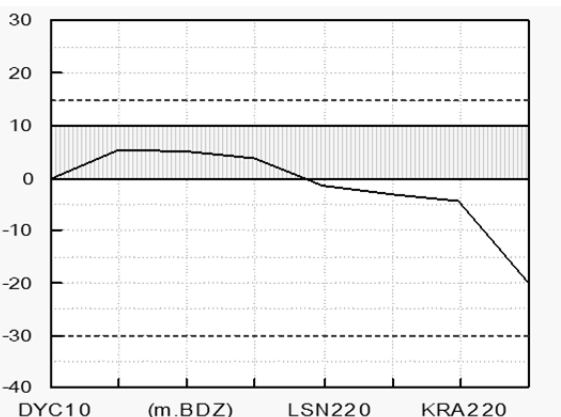


Rys.7. Przebieg procentowego obciążenia transformatora (kolor szary – bieg jałowy, kolor czarny – obciążenie).

Dla wybranej wartości rozstrojenia obciążenie obu transformatorów jest na poziomie 60%, a więc nie zagraża ich dalszej pracy w przypadku odbudowywania systemu. Zgodnie z uzyskanymi wynikami różnica przekładni nie powinna być większa niż 24%, lecz zgodnie z rys. 5. widać, że takie procentowe rozstrojenie przekładni nie pozwala na utrzymanie poprawnych warunków napięciowych w torze rozruchowym.



Rys.8. Odchylenie napięcia od wartości znamionowej na biegu jałowym.



Rys.9. Odchylenie napięcia od wartości znamionowej pod obciążeniem

Dla porównania warunków przed kompensacją i po kompensacji z wykorzystaniem równolegle połączonych autotransformatorów przedstawione zostały przebiegi odchylenia stanu napięć po kompensacji dla biegu jałowego (rys. 8.), gdzie nie widać już przekroczeń i dla obciążenia (rys. 9.), gdzie napięcia nawet po załączeniu obciążenia nie spadają poniżej wartości krytycznych.

### Podsumowanie

Na przykładnie toru rozruchowego między elektrownią rozruchową EW Dychów, a elektrownią systemową Dolna Odra przedstawiona została możliwość wykorzystania istniejących elementów systemu do odbudowy w przypadku wystąpienia awarii katastrofalnej. Problemy związane ze wzrostem lub spadkiem napięć powyżej wartości nominalnych oraz problemy związane z mocą bierną wymagają wykonania odpowiednich testów oraz prób, ale także symulacji, które pozwolą na dobranie odpowiednich nastaw i parametrów w trakcie wykonywania próby.

Kompensacja mocy biernej pojemnościowej linii w przypadku opisywanego toru rozruchowego jest metodą korzystną przede wszystkim z punktu widzenia ekonomicznego. Kupno dławików kompensacyjnych dla linii przewidzianych jako element możliwego ciągu rozruchowego wiązałby się dla OSP z ogromnymi kosztami, natomiast wykorzystanie istniejących elementów struktury pozwala na ograniczenie kosztów modernizacji linii.

Inną ważną zaletą tego rozwiązania jest możliwość wcześniejszego zamodelowania próby dla dowolnie wybranych elektrowni i toru rozruchowego w celu dobrania optymalnego procentowego rozstrojenia przekładni transformatorów. W przypadku utrudnionej komunikacji równoległa praca transformatorów w stacji przy ustalonej różnicy przekładni pozwala na pewne i optymalne wykonanie procesów odbudowy.

Istotną wadą takiego rozwiązania są możliwości techniczne. Oznacza to, że nie w każdym przypadku tor rozruchowy będzie zawierał stacje o równolegle połączonych transformatorach i dla takich torów w planach odbudowy powinny znaleźć się inne możliwości kompensacji mocy biernej pojemnościowej linii.

**Autorzy:** mgr inż. Aleksandra Schött, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: aleksandra.schott@put.poznan.pl

### LITERATURA

- [1] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej z dnia 15.12.2011 r. z aktualizacją z dnia 28.11.2017 r.
- [2] Grzędzielski I., Sroka K., Marszałkiewicz K., *Samostart i podanie napięcia oraz mocy rozruchowej z elektrowni wodnej Dychów do elektrowni Dolna Odra – próba systemowa*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88 NR 9a/2012.
- [3] Grzędzielski I., Sroka K., Radsak D., Borodynko J. *Elektrownia wodna Dychów jako źródło rozruchowe dla odbudowy zdolności wytwórczych elektrowni ciepłych w zachodniej części krajowego systemu elektroenergetycznego, Blackout a Krajowy System Elektroenergetyczny*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych ICHB PAN, Poznań 2016, s.281-298.
- [4] Standardowa Specyfikacja Funkcjonalna. Stacje elektroenergetyczne najwyższych napięć. PSE – SF.STACJE/2015.