

## Uruchamianie bloku energetycznego z jednostki pracującej na potrzeby własne w warunkach awarii systemowej

**Abstract:** *The paper presents an analysis of the possibility of the power unit start-up from the another unit remaining in house load operation. Two ways of supply of an auxiliary board during power unit start-up have been considered. Advantages and disadvantages of both methods have been discussed.*

**Keywords:** power plant auxiliaries, transient analysis, power unit start-up, blackout

### Wstęp

Duże elektrownie systemowe spełniają szczególną rolę w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). Spoczywają na nich zadania obrony i odbudowy systemu elektroenergetycznego wyznaczone przez operatora systemu przesyłowego (OSP) na wypadek awarii systemowej. Regulamin Regulacyjnych Usług Systemowych (RUS) [1] wyróżnia usługi systemowe gotowości elektrowni do odbudowy zasilania KSE. Usługi te obejmują gotowość elektrowni do pracy w układach wyspowych oraz gotowość do samostartu elektrowni. OSP dokonuje wyboru jednostek wytwórczych świadczących usługi systemowe gotowości do odbudowy zasilania KSE. Regulamin RUS określa ogólne wymagania techniczne dla jednostek biorących udział w odbudowie systemu, jednak szczegółowe wymagania określa operator dla każdej jednostki wytwórczej w zależności od jej roli w tym procesie. Podczas rozwijającej się awarii systemowej wybrane bloki elektrowni przejdą do stanu pracy na potrzeby własne (PPW). Jest to ważny element strategii odbudowy systemu elektroenergetycznego. Pracujący na PPW blok może stać się źródłem zasilania dla jednostki pozostającej w postoju dyspozycyjnym i posłużyć do jej uruchomienia. Dwie jednostki wytwórcze elektrowni, pracujące równolegle i obciążone potrzebami własnymi, stanowią pewniejszy układ dla odbudowującego się systemu elektroenergetycznego.

Przedmiotem niniejszej pracy jest analiza porównawcza pod względem bezpieczeństwa dwóch sposobów uruchomienia bloku pozostającego w postoju dyspozycyjnym za pomocą bloku pracującego na PPW:

**A** – poprzez most zasilania rezerwowego 6 kV (rys. 1a),

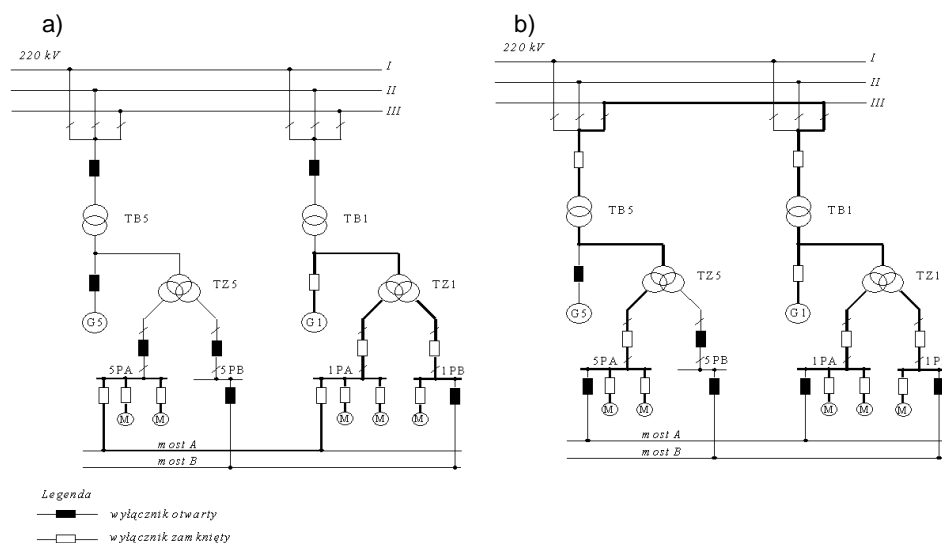
**B** – poprzez wydzielony fragment systemu 220 kV (rys. 1b).

Rysunki 1a i 1b przedstawiają przykładową sytuację uruchamiania bloku 5 z bloku 1 pracującego na PPW.

Układ zasilania poprzez wydzielony system 220 kV (układ **B**) odpowiada uruchamianiu bloku w normalnych warunkach pracy KSE. Niemniej w stanach awaryjnych KSE szyny rozdzielni systemowej mogą być niedostępne dla obsługi elektrowni. Wówczas pozostaje możliwość uruchomienia bloku z pominięciem rozdzielni systemowej, poprzez most szynowy zasilania rezerwowego (układ **A**). Taka konfiguracja połączeń odbiega od normalnej, chociażby ze względu na jednoczesne zamknięcie wyłączników zasilania podstawowego i rezerwowego rozdzielni 1PA (rys. 1a), a tym samym obciążenie wyłącznika podstawowego tej rozdzielni sumarycznym prądem sekcji

1PA i 5PA. Zatem analiza możliwości uruchomienia bloku pozostającego w postoju dyspozycyjnym z bloku pracującego na PPW wymaga rozpatrzenia:

- czułości zabezpieczeń dla obu dróg uruchomienia bloku (**A**, **B**), pod względem kierunkowości działania zabezpieczeń (transformatory zaczepowe TZ i rezerwowe);
- poziomu mocy zwarciovych na szynach rozdzielni potrzeb własnych dla obu dróg uruchomienia bloku (**A**, **B**);
- bezpieczeństwa obsługi i warunków pracy wyłączników; określenia wzrostu wartości prądów w układzie potrzeb własnych bloku pracującego na PPW i dodatkowo zasilającego potrzeby własne drugiego bloku poprzez most szynowy (**A**);
- warunków rozruchu pompy wody zasilającej (PWZ) dla obu sposobów uruchomienia bloku (**A**, **B**).



Rys. 1. Schemat połączeń uruchomienia innego bloku (blok 5) z bloku pracującego na PPW (blok 1)  
a) poprzez most zasilania rezerwowego 6 kV (układ A),  
b) poprzez wydzielony fragment systemu 220 kV (układ B)

Należy podkreślić, że w warunkach awarii systemowej, przed uruchomieniem drugiego bloku należy dążyć do zapewnienia dostępności systemu szyn 220 kV celem jak najszybszego przywrócenia zasilania potrzeb własnych ogólnych przez transformatory rezerwowe. Należy uwzględnić fakt, że układy zasilania awaryjnego z baterii prądu stałego mają ograniczony czas pracy ze względu na pojemność baterii.

#### Warunki pracy układu elektrycznego w konfiguracji „układu A”

W przypadku, w którym rozdzielnia 5PA zasilana jest poprzez most szynowy z rozdzielni 1PA (rys. 1a), mamy do czynienia z nietypowym układem pracy wyłączników zasilania podstawowego i rezerwowego rozdzielni 1PA. Jednoczesne zamknięcie obu wyłączników wymaga zdjęcia blokady uniemożliwiającej taki stan pracy wyłączników. Konfiguracja ta jest również nietypowa z punktu widzenia pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Pole zasilania rezerwowego wyposażone jest m.in. w zabezpieczenie ziemnozwarciowe typu Zlo1 kierunkowe [3]. Zabezpieczenie to działa na otwarcie wyłącznika zasilania rezerwowego. W przypadku zwarcia doziemnego na moście szynowym A (mało prawdopodobne) nie ma możliwości zadziałania zabezpieczenia kierunkowego wyłącznika rezerwowego rozdzielni 1PA (przepływ mocy zwarciowej przeciwny do kierunku pracy zabezpieczenia). Wówczas zadziała

## **VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012**

zabezpieczenie nadprądowe rezystora uziemiającego transformator TZ1 i otwarty zostanie wyłącznik zasilania podstawowego (zakończenie pracy na PPW bloku 1). W tej sytuacji mamy nieselektywne działanie zabezpieczeń, spowodowane nietypową konfiguracją układu. Na czas nietypowej konfiguracji układu elektrycznego należałoby zatem zmienić nastawy zabezpieczeń lub nie zmieniać nastaw, licząc się z brakiem selektywności działania w przypadku zwarcia. Pozostaje wątpliwość, czy w warunkach blackoutu takie przestawianie zabezpieczeń będzie w ogóle możliwe, biorąc pod uwagę warunki oświetlenia awaryjnego bądź nawet braku oświetlenia, a także wysoce stresogenne okoliczności.

Szczegółowego rozpatrzenia wymagają warunki obciążenia rozdzielni 1PA podczas pracy w konfiguracji „układu A”. Największy odbiornik potrzeb własnych - silnik napędzający rezerwowo-rozruchową pompę wody zasilającej (PWZ), przyłączony jest do jednej z sekcji rozdzielni potrzeb własnych – na blokach nieparzystych – do sekcji PA, na blokach parzystych do sekcji PB. Spodziewany sumaryczny prąd obciążenia podczas uruchamiania bloku, dla pojedynczej sekcji rozdzielni potrzeb własnych P (z załączoną PWZ), należy przyjąć na poziomie zarejestrowanym podczas prób uruchamiania bloku [2], czyli ok. 1,2 kA. Biorąc powyższe pod uwagę, w konfiguracji uruchamiania bloku poprzez most szynowy zasilania rezerwowego (układ A – rys. 1a), w układzie potrzeb własnych bloku pracującego na PPW i dodatkowo zasilającego potrzeby własne drugiego bloku poprzez most szynowy, spodziewana wartość prądu może być dwukrotnie wyższa, czyli wynosić ok. 2,4 kA. Wartość prądu obciążenia dotyczy przypadku pracy bloku z wyłączonym układem odsiarczania i bez uwzględniania możliwości załączenia dodatkowych odbiorów (np. sprężarki powietrza TK – 2 MW). Zważywszy na prądy znamionowe wyłączników (2,5 kA) zasilania podstawowego i rezerwowego oraz na spodziewane wartości prądów obciążenia (2,4 kA), wyłączniki mogłyby pracować na granicy swojej obciążalności. Byłyby to warunki znacznie przewyższające maksymalne obciążenia robocze występujące w rozdzielni P (1,9-2,1 kA). W części rozdzielni P wyłączniki 2,5 kA zostały wymienione na aparaty o wyższym prądzie znamionowym – 3,15 kA. Reasumując, ze względu na ekstremalne warunki pracy wyłączników, nie jest zalecana konfiguracja uruchamiania bloku poprzez most szynowy zasilania rezerwowego (układ A) w sytuacji, gdy układ potrzeb własnych bloku pracującego na PPW dodatkowo zasila potrzeby własne drugiego bloku. Ze względu na przemienne umieszczanie pola zasilającego PWZ w rozdzielniach P kolejnych bloków (na blokach nieparzystych w PA, na parzystych w PB), jako zalecaną należy traktować konfigurację, w której z bloku nr 1 uruchamiany jest blok 2 lub 4, natomiast niezalecaną, gdy z bloku nr 1 uruchamiany jest blok 3 bądź 5 (rys. 1a). Takie skojarzenie bloków podczas uruchamiania (np. 4 z 1) pozwala także na zwiększenie obciążenia rozdzielni P sprężarką TK.

### **Symulacja rozruchu silników potrzeb własnych w obu konfiguracjach**

Jednym z istotnych parametrów mających wpływ na warunki rozruchu silników jest reaktancja toru zasilania. Poniżej przedstawiono obliczenia reaktancji poszczególnych elementów układu zasilania.

Reaktancja transformatora blokowego:

$$X_{TB} = \frac{u_z \cdot U_N^2}{100 S_N} = \frac{12 \cdot (6 \text{ kV})^2}{100 \cdot 426 \text{ MV} \cdot \text{A}} = 0,0101 \Omega$$

Reaktancja transformatora odczepowego między uzwojeniami 22 kV-6 kV:

$$X_{TZ} = \frac{u_z U_N^2}{100 S_N} = \frac{14}{100 \cdot 50} \frac{(6 \text{ kV})^2}{\text{MV} \cdot \text{A}} = 0,101 \Omega$$

Reaktancja mostu szynowego między rozdzielniami 1PA-5PA:

$$X_M = 0,0086\Omega + 0,0018\Omega + 0,0086\Omega + 0,0018\Omega = 0,0208\Omega$$

Reaktancja linii blokowej:

$$X_{LB} = X_1 \cdot l \cdot \vartheta^2 = 0,33 \Omega / \text{km} \cdot 5,3 \text{ km} \cdot (6 / 220)^2 = 0,0013 \Omega$$

Reaktancja na drodze: zaciski generatora 1 – rozdzielnia 5PA:

- układ **A** (rys. 1a)

$$X_A = X_{TZ} + X_M = 0,122 \Omega$$

- układ **B** (rys. 1b)

$$X_B = X_{TB} + X_L + X_L + X_{TB} + X_{TZ} = 0,124 \Omega$$

Jak widać wartości reaktancji dla obu sposobów uruchamiania bloku są niemal identyczne, a decydujące znaczenie odgrywa reaktancja transformatora odczepowego TZ1.

W rozpatrywanym przypadku uruchamiania bloku z bloku pracującego na PPW, mamy do czynienia z samotnie pracującym generatorem zasilającym potrzeby własne dwóch bloków. Napięcie na zaciskach generatora ulega odchyleniom podczas trwania stanu nieustalonego, polegającego na załączeniu dużego napędu w rozdzielni potrzeb własnych. Zmiany napięcia zależą m.in. od reaktancji generatora.

Podczas rozruchu największego silnika napędzającego PWZ, należy liczyć się z prądem rozruchowym rzędu 3000 A po stronie 6 kV, czyli ok. 800 A po stronie 22 kV. Rozruch PWZ powoduje zatem wzrost obciążenia generatora prądem stanowiącym ok. 7% prądu znamionowego generatora. Przy założeniu, że w generatorze składowa podłużna prądu stojana  $i_d$  oraz siła elektromotoryczna wzbudzenia  $e_f$  nie ulegają silnym zmianom, generator można odwzorować modelem klasycznym [4, 5]. W modelu tym generator odwzorowuje się równaniem ruchu wirnika oraz stałą co do modułu siłą elektromotoryczną  $e'$  za reaktancją  $X_d'$ .

Reaktancja przejściowa generatora GTHW-360 wynosi:

$$X_d' = \frac{x_d' U_N^2}{100 S_N} = \frac{33}{100 \cdot 426} \frac{(6 \text{ kV})^2}{\text{MV} \cdot \text{A}} = 0,0279 \Omega$$

Symulacje rozruchu dużych napędów potrzeb własnych zostały wykonane za pomocą programu komputerowego opracowanego przez autora. Program ten był wielokrotnie weryfikowany i stosowany do obliczeń stanów przejściowych w układach potrzeb własnych elektrowni.

Symulacje komputerowe zostały przeprowadzone przy następujących założeniach:

- Założono stałą wartość częstotliwości napięcia wytwarzanego przez generator, zatem pominięto efekt zmniejszenia częstotliwości po załączeniu dużego silnika. Jest to założenie zmieniające warunki zakłócenia na bardziej niekorzystne dla silników (zmniejszenie częstotliwości powoduje zmniejszenie momentów obciążenia silników, zatem ułatwia ich rozruch). Wyniki przeprowadzonych prób rozruchu silnika PWZ w stanie PPW bloku dają pewność statecznej pracy układu przy nagłych zmianach obciążenia w granicach 5 MW [2] i warunki statecznej pracy nie muszą być przedmiotem dodatkowego sprawdzania.

- Założono stałą wartość siły elektromotorycznej  $e'$  za reaktancją  $X_d'$  generatora, pominięto działanie układu wzbudzenia generatora. Jest to założenie zmieniające warunki zakłócenia na bardziej niekorzystne dla silników (działający układ regulacji wzbudzenia będzie zwiększał wartość napięcia na zaciskach generatora po jego skokowym obciążeniu, poprawiając warunki napięciowe rozruchu w rozdzielniach 6 kV potrzeb własnych).

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

- Założono najbardziej niekorzystną konfigurację tzn. przypadek uruchamiania bloku nr 5 z bloku nr 1 (rys. 1a, 1b). W układzie zasilania z mostu szynowego konfiguracji tej odpowiada największa wartość reaktancji mostu szynowego oraz podwojenie obciążenia rozdzielni 1PA. Z powodów wymienionych wcześniej konfiguracja ta nie jest zalecana.
- Za najbardziej krytyczny moment uruchamiania bloku uznano rozruch silnika potrzeb własnych o największej mocy i wykonano symulacje rozruchu silnika 6300 kW, napędzającego rezerwowo-rozruchową PWZ.
- Ze względu na planowaną kolejność załączania poszczególnych napędów i obawy związane z uruchamianiem jako ostatniego, drugiego co do wielkości mocy napędu, wykonane zostały również symulacje załączania silnika wentylatora spalin (WS) o mocy 3150 kW.
- W chwili załączania zarówno PWZ jak i WS pracowały inne napędy potrzeb własnych dając zakładany poziom obciążenia rozdzielni 1PA i 5PA.
- Załączenie silnika w każdej symulacji następuje w chwili  $t=0,5$  s.
- Dla uzyskania porównywalności poszczególnych wariantów obliczeń, w każdym przypadku utrzymywano jednakową wartość napięcia na zaciskach generatora. Wartości napięć w rozdzielnicach 6 kV przed załączeniem silnika zbliżone były do znamionowych.

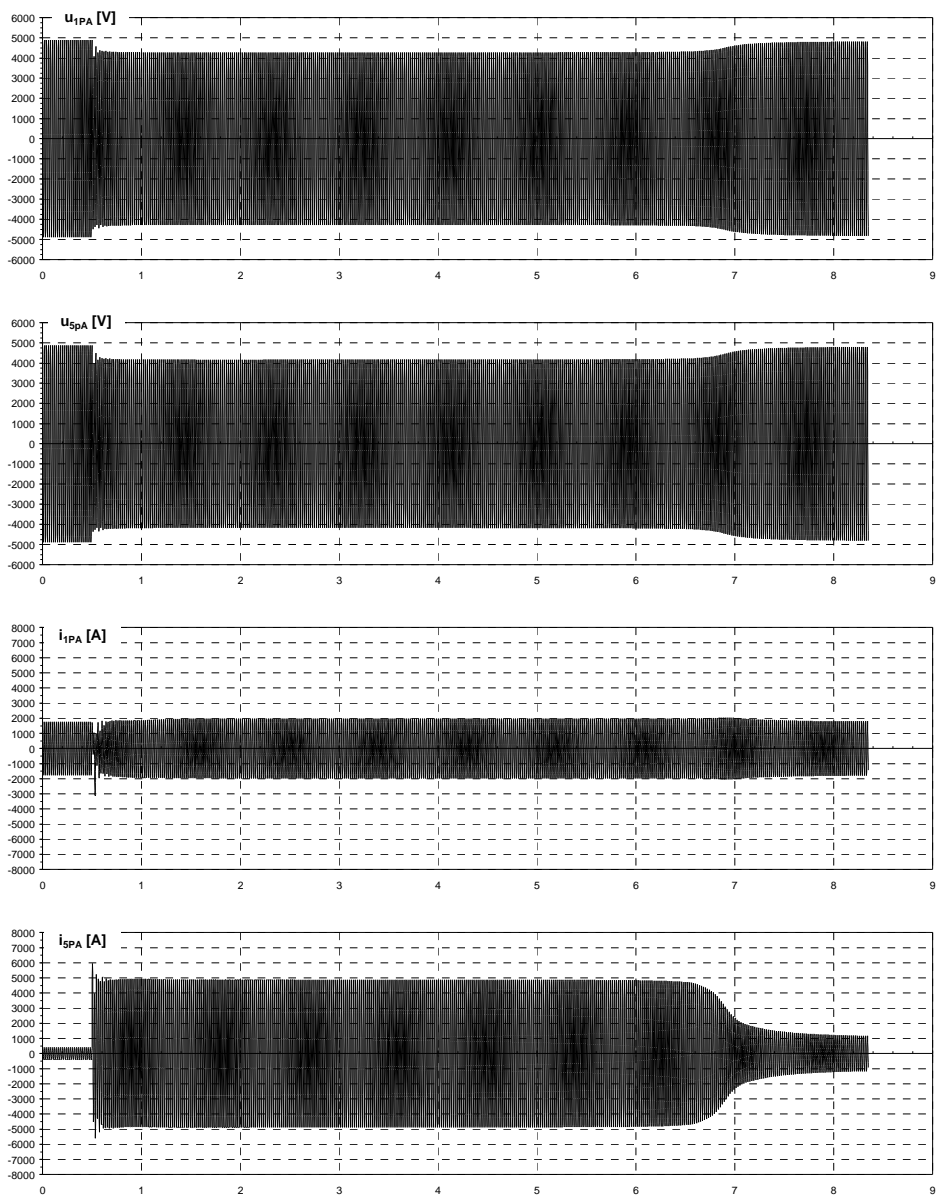
Obliczenia wykonano dla 4 wariantów symulacji, które opisano w tabeli 1. Ze względu na ograniczoną objętość niniejszego tekstu, przedstawiono jedynie wybrane przebiegi uzyskane na drodze symulacji (rys. 2). Ponadto, najistotniejsze wartości prądów i napięć, przed załączeniem silnika i po jego załączeniu zebrano w postaci tabelarycznej (tabela 2) dla obu rozdzielni 1PA oraz 5PA.

Tabela 1. Charakterystyka wariantów symulacji

| Wariant | Układ rozruchu bloku 5          | Załączany silnik w rozdzielni 5PA | Przebiegi z wynikami symulacji |
|---------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1       | A – z mostu szynowego (rys. 1a) | PWZ                               | rys. 2                         |
| 2       |                                 | WS                                | -                              |
| 3       | B – z systemu 220 kV (rys. 1b)  | PWZ                               | -                              |
| 4       |                                 | WS                                | -                              |

Tabela 2. Wyniki obliczeń symulacyjnych dla rozruchu dużych silników potrzeb własnych

| Wariant | Rozdzielnia | Przed załączeniem silnika |       |        | 1 s po załączeniu silnika |       | Czas rozruchu $t_r$ [s] |
|---------|-------------|---------------------------|-------|--------|---------------------------|-------|-------------------------|
|         |             | U [kV]                    | I [A] | P [MW] | U [kV]                    | I [A] |                         |
| 1       | 1PA         | 5,99                      | 1260  | 10,8   | 5,25 (87%)                | 1410  | 6,5                     |
|         | 5PA         | 5,98                      | 290   | 2,4    | 5,12 (85%)                | 3520  |                         |
| 2       | 1PA         | 5,89                      | 1280  | 10,8   | 5,43 (90%)                | 1370  | 5,9                     |
|         | 5PA         | 5,87                      | 970   | 8,1    | 5,34 (89%)                | 2850  |                         |
| 3       | 1PA         | 6,03                      | 1260  | 10,8   | 5,86 (98%)                | 1290  | 5,9                     |
|         | 5PA         | 6,12                      | 280   | 2,4    | 5,24 (87%)                | 3600  |                         |
| 4       | 1PA         | 6,00                      | 1260  | 10,8   | 5,91 (98%)                | 1280  | 5,7                     |
|         | 5PA         | 6,01                      | 950   | 8,1    | 5,47 (91%)                | 2890  |                         |



Rys. 2. Wariant 1 - układ A - rozruch PWZ w rozdzielni 5PA. Przebiegi napięć na szynach rozdzielni 1PA oraz 5 PA. Przebiegi prądów w rozdzielniach 1PA (tylko odbiory bloku nr 1) i 5PA

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

### **Wnioski**

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można sformułować następujące wnioski:

- W przeprowadzonych symulacjach nie stwierdzono zakłóceń uniemożliwiających poprawny rozruch silników. Występujące podczas rozruchu spadki napięć nie stanowią zagrożenia utykami dla innych silników.

Warunki rozruchu silników są gorsze dla przypadku uruchamiania bloku nr 5 poprzez most szynowy (warianty 1 i 2). Spowodowane jest to przepływem prądu rozruchowego w torze zasilania rozdzielni 1PA, znacznym obniżeniem napięcia na szynach 1PA i wzrostem prądu silników zasilanych z tej rozdzielni. W przypadku rozruchu z szyn rozdzielni 220 kV (wariant 3 i 4) prąd rozruchowy silników załączanych w rozdzielni 5PA powoduje spadki napięć w torze wyprowadzenia mocy z generatora TG1, nieznacznie tylko zmniejszając napięcie na zaczeple transformatora TZ1 zasilającego rozdzielnię 1PA.

Tabela 3. Zestawienie zalet i wad obu sposobów uruchomienia bloku

| Układ A (rys. 1a) |   | Układ B (rys. 1b) |  |
|-------------------|---|-------------------|--|
| (+)               | Możliwość uruchomienia bloku, gdy niedostępny jest system 220 kV.   | (-)               | Brak możliwości uruchomienia bloku, gdy niedostępny jest system 220 kV.  |
| (-)               | Konieczność deblokady zabezpieczenia przed jednoczesnym zamknięciem wyłączników zasilania podstawowego i rezerwowego w rozdzielni P   |                   |  |
| (-)               | Zabezpieczenie kierunkowe od zwarć doziemnych wyłącznika zasilania rezerwowego nie zapewnia selektywności działania zabezpieczeń.   | (+)               | Zachowana kierunkowość działania zabezpieczenia od zwarć doziemnych wyłącznika zasilania rezerwowego.                              |
| (-)               | Aktualne nastawy czasu zadziałania zabezpieczenia nadprądowego rezystora uziemiającego transformator TZ nie zapewniają selektywnego działania zabezpieczeń.   | (+)               | Zapewnione jest selektywne działanie zabezpieczeń.   |
| (-/+)             | Rozdzielnia P bloku pracującego na PPW i dodatkowo zasilającego potrzeby własne drugiego bloku poprzez most szynowy może być obciążona sumarycznym prądem obu rozdzielni. Stanowi to zagrożenie dla warunków bezpiecznej pracy wyłącznika zasilania podstawowego ze względu na wartości prądów zbliżone bądź przekraczające ich prądy znamionowe (-). Zagrożenie takie nie dotyczy przypadku zalecanej konfiguracji uruchamiania bloku „parzystego” z bloku „nieparzystego” bądź odwrotnie (+). | (+)               | Obciążenie rozdzielni P nie odbiega od normalnych warunków eksploatacji bloku.   |
|                   |   | (+)               | Lepsze warunki rozruchu silników załączanych w rozdzielni P uruchamianego bloku. Mniejsze zakłócenia dla pracujących już silników. |
| (-)               | Po wystąpieniu blackoutu i niedostępnym systemie 220 kV transformatory rezerwowe pozbawione są zasilania. Pierwszoplanowym celem staje się przywrócenie zasilania mazutowni, sprężarkowni i pompowni wody ruchowej.   | (+)               | Zasilanie mazutowni, sprężarkowni i pompowni wody ruchowej zapewnione jest z szyn 220 kV, zasilających transformatory rezerwowe.   |

- W przypadku rozruchu poprzez most szynowy większemu zakłóceniu ulega praca napędów rozdzielni 1PA (warianty 1 i 2).
- W przypadku rozruchu bloku poprzez szyny 220 kV, załączanie silników w rozdzielni 5PA wywołuje znacznie mniejsze zakłócenia w pracy silników zasilanych z rozdzielni 1PA.
- Największe zakłócenia w postaci spadków napięć i wartości prądów rozruchowych pojawiają się podczas rozruchu silnika PWZ.
- Uruchamiany w ostatniej kolejności silnik WS ma odpowiednie warunki rozruchu. Jednakże, w przypadku uruchamiania bloku z mostu szynowego, po uruchomieniu WS istnieje zagrożenie przekroczenia prądów znamionowych wyłączników zasilania podstawowego w rozdzielni 1PA.
- Ze względu na wywoływane zakłócenia należałoby stosować zasadę uruchamiania w pierwszej kolejności silników o największej mocy, a tym samym zaniechać uruchamiania jako ostatniego silnika WS.

W formie tabelarycznej (tabela 3) zestawiono zasadnicze zalety (+) i wady (-) obu sposobów uruchamiania drugiego bloku z bloku pracującego na PPW. Szereg wad układu A wynika z jego nietypowej dla elektrowni konfiguracji, niejako pracy „do tyłu” odgałęzienia z szyn mostu zasilania rezerwowego. Wady układu A stanowią o zaletach układu B. Podsumowując należy stwierdzić, że oba rozpatrywane sposoby uruchamiania bloku są możliwe do zrealizowania w warunkach awarii systemowej, aczkolwiek przytoczone wyżej argumenty wskazują, że bezpieczniejszy jest sposób rozruchu poprzez szyny 220 kV.

#### **Literatura**

1. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Regulamin Regulacyjnych Usług Systemowych. PSE – Operator 2004.
2. Bekasiak W., Mazurkiewicz E., Wykonane w Elektrowni Bełchatów SA prace do obrony i restytucji elektrowni w stanach katastrofalnych KSE. Black-out a krajowy system elektroenergetyczny, seminarium ogólnopolskie, Poznań 2004, Energetyka, zeszyt tematyczny nr 2, str. 8-18.
3. Bekasiak W., Michalczyk R.: Szczegółowa instrukcja eksploatacji układów zabezpieczeń elektrycznych bloków 360 MW. Bełchatów 1985.
4. Machowski J., Bernas S.: Stany nieustalone i stabilność systemu elektroenergetycznego. WNT, Warszawa 1989.
5. Zajczyk R.: Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów regulacyjnych. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2003.

*Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez NCBiR w ramach umowy SP/E/1/67484/10.*

**Autor:** Janusz Buchta, dr inż., Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul.Stefanowskiego 18/22, 90 924 Łódź, e-mail: janusz.buchta@p.lodz.pl