

BADANIA SYMULACYJNE OBRONY SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO UWZGLĘDNIAJĄCE ZAPISY KODEKSU NC ER/2017 W ZAKRESIE AUTOMATYKI SCO

Ireneusz GRZĄDZIELSKI,¹ Mikołaj ZAKRZEWSKI,² Volodymyr KONOVAL³

1. Pracownia Badań i Analiz Technicznych s. j.
e-mail: ireneusz.grzadzieski@pbiat.pl
2. Pracownia Badań i Analiz Technicznych s. j.
e-mail: mikolaj-zakrzewski@o2.pl
3. Politechnika Lwowska, Eleks Dakar
e-mail: volodymyr.konoval@eleks.com

Streszczenie: W planie obrony systemu elektroenergetycznego, w przypadku nagłego niezbilansowania związanego z deficytem mocy generacyjnej, jako podstawowy środek obrony stosuje się automatykę Samoczynnego Częstotliwościowego Odciążania (SCO). Każdy z OSP, którego dotyczy NC ER/2017, zobowiązany jest do stosowania w swoim planie obrony automatyki SCO spełniającej podane w kodeksie wytyczne. W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych, za pomocą programu DAKAR, zamodelowano automatykę SCO zgodnie z wytycznymi NC ER/2017 oraz dotychczasowymi wymogami IRiESP. Wydzielony obszar dotyczył północno-zachodniej części KSE z dużym niezbilansowaniem i nagłym spadkiem częstotliwości. Zwrócono uwagę na konieczne do wprowadzenia zmiany w nastawach automatyki SCO w celu spełnienia wymogów NC ER/2017, a także wskazano zalety zapisów kodeksu.

Słowa kluczowe: awaria katastrofalna, obrona systemu elektroenergetycznego, automatyka SCO, badania symulacyjne procesu obrony.

1. WPROWADZENIE

W przypadku niezbilansowania mocy czynnej, tj. pojawienie się różnicy pomiędzy mocą czynną generowaną a sumą mocy czynnej odbieranej oraz mocy strat przesyłowych w systemie elektroenergetycznym (SE), następuje odchylenie częstotliwości systemowej od znamionowej.

W procedurach postępowania podczas obrony SE, zmiany częstotliwości systemowej odpowiadają za określenie zadziałania automatyk przewencyjnych. Plan obrony systemu zgodnie z Network Code of Electricity Emergency and Restoration [1] (dalej NC ER) zawiera co najmniej następujące środki techniczne (automatyki zabezpieczeniowe) oparte na kryteriach zmian częstotliwości (roz. II art.15 i 16):

- automatykę w przypadku spadku częstotliwości,
- automatykę w przypadku wzrostu częstotliwości.

Z działań automatycznych w sieci bardzo ważną rolę odgrywa automatyka SCO (ang. Under Frequency Load Shedding – UFLS), która jest skoordynowanym układem reagującym na spadki częstotliwości w przypadku spadku mocy generowanej w sieci, w celu regulacji mocy

zapotrzebowania, poprzez odłączanie z góry ustalonej części obciążeń.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych pracy automatyki SCO w wybranym obszarze Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Wybrano obszar, którego wydzielenie powoduje znaczny deficyt mocy czynnej. Przeprowadzono szereg symulacji komputerowych wykorzystując program DAKAR [2, 3].

2. STANDARYZACJA NASTAW AUTOMATYKI SCO

2.1. Dotychczasowe zapisy IRiESP w zakresie nastaw automatyki SCO

Zgodnie z zapisami w IRiESP [4] częstotliwość znamionowa w polskim SE wynosi 50 Hz, natomiast jej wartość średnia z pomiaru 10-sekundowego przez 99,5% tygodnia powinna się mieścić w zakresie 50 Hz $\pm 1\%$ (49,5÷50,5 Hz) oraz przez 100% tygodnia 50 Hz +4%/–6% (47÷52 Hz) [4].

Układy automatyki SCO zgodnie z IRiESP powinny spełniać następujące wymagania [4]:

- możliwość nastawienia wartości częstotliwości z zakresu od 47 do 50 Hz ze skokiem co 0,05 Hz,
- możliwość nastawienia zwłoki czasowej z zakresu od 0,05 do 1 s ze skokiem co 0,05 s,
- czas własny przekaźników nie może być większy niż 100 ms,
- poprawna praca w zakresie od 0,5 do 1,1 Un (krotność napięcia znamionowego),
- dokładność pomiaru częstotliwości na poziomie co najmniej 10 mHz.

Obecnie stosowane nastawy automatyki SCO zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1 Aktualne nastawy dla automatyki SCO w KSE [5]

Stopień SCO	Próg odciążenia [Hz]	Moc odciążenia* [%]	Zwłoka czasowa** [s]
1	49,0	15	0,2
2	48,7	15	0,2
3	48,5	10	0,2
4	48,3	5	0,5
5	48,1	5	0,5

- * – moc odciążenia odniesiona do szczytowego obciążenia KSE,
 ** – suma czasu własnego przekaźnika i nastawy zwłoki.

2.2. Wymagania stawiane automatyce SCO przez NC ER

Każdy z OSP, którego dotyczy NC ER, zobowiązany jest do opracowania w swoim planie obrony SE automatyki SCO spełniającej wytyczne zestawione w tabelicy 2. Przy czym zakres wdrożenia określa maksymalne dopuszczalne odchylenie odłączanego obciążenia netto od docelowego odbioru odłączanego netto przy danej częstotliwości, obliczone poprzez interpolację liniową między początkowym poziomem obowiązkowym a końcowym poziomem obowiązkowym. Jednakże zakres wdrożenia nie może pozwalać na odłączenie obciążenia netto mniejszego niż wielkość odbioru odłączanego netto przy początkowym poziomie obowiązkowym. Ponadto zgodnie z ustępem 10 OSP może ująć w automatyce SCO dodatkowe stopnie dotyczące odłączenia obciążenia poniżej określonego w tabelicy 2 końcowego poziomu obowiązkowego odłączenia odbioru. Na Rys. 2. przedstawiono wymogi stawiane przed automatyką SCO wg NC ER wraz z naniesionymi aktualnymi nastawami układu w polskim KSE zgodnie z tabelicą 1.

Tabela 2 Charakterystyka automatyki SCO wg NC ER

Parametr	Europa kontynentalna	Obszar nordycki	Wielka Brytania	Irlandia
Początkowy obowiązkowy poziom odłączenia odb.: Częstotliwość [Hz]	49	48,7 48,8	48,8	48,85
Pocz. obowiązkowy poziom odłączenia odb.: Odłączany odbiór [% całk. obc.]	5	5	5	6
Końcowy obowiązkowy poziom odłączenia odb.: Częstotliwość [Hz]	48	48	48	48,5
Końcowy obowiązkowy poziom odłączenia odb.: Odłączany odbiór [% całk. obc.]	45	30	50	60
Zakres wdrożenia [% całk. obc.]	± 7	± 10	± 10	± 7
Minimalna liczba etapów do osiągnięcia końcowego obowiązkowego poziomu [-]	6	2	4	6
Maksymalne odłączenie odbioru dla każdego etapu [% całk. obc.]	10	15	10	12

Porównując aktualne nastawy automatyki SCO w polskim SE przedstawione w tabelicy 1 z nowymi wymogami stawianymi przez NC ER, należy zwrócić uwagę na kilka kwestii. Pierwszą z nich jest obecnie zbyt mała liczba stopni automatyki, gdyż aktualnie w KSE występuje ich 5, podczas gdy NC ER dla obszaru synchronicznego Europy kontynentalnej wymaga co najmniej 6. Ponadto wymagana jest częstotliwość 48 Hz dla ostatniego stopnia. Oba te fakty oznaczają konieczność wprowadzenia dodatkowego stopnia dla częstotliwości 48 Hz, a także prawdopodobnie przesunięcie progów pozostałych, aby zachować stały odstęp między sąsiednimi stopniami. Kolejną

kwestią poruszoną w NC ER jest zapis o unikaniu celowego opóźniania zadziałania automatyki (wprowadzaniu zwłok czasowych). Tymczasem aktualnie w Polsce dla stopnia 4. i 5. wprowadza się zwłokę czasową na poziomie 0,5 s. Przechodząc do poziomów odciążenia, warto zwrócić uwagę, iż do tej pory w nastawach automatyki SCO, zgodnie z IRIESP odnoszono się do mocy brutto, natomiast NC ER odnosi się do mocy netto.

3. BADANIA SYMULACYJNE DZIAŁANIA AUTOMATYKI SCO ZA POMOCĄ PROGRAMU DAKAR

3.1. Model KSE opracowany do badań symulacyjnych w programie DAKAR

W programie DAKAR zamodelowano KSE wraz z ekwiwalentami sieci zewnętrznych na poziomie napięć sieci przesyłowych i przesyłowo-rozdzielczych od 400 kV do 110 kV włącznie do 750 kV wraz z generacją, odbiorami oraz innymi niezbędnymi do prawidłowej pracy systemu elementami. Podstawą do opracowania modelu były pliki w standardzie kdm. Model ma za zadanie odzwierciedlać zjawiska statyczne oraz dynamiczne zachodzące w KSE i służy do przeprowadzenia badań symulacyjnych. Dodatkowe brakujące dane pozyskiwano z katalogów, opracowań [6], [7], [8], a także na podstawie własnych doświadczeń. Wykorzystując zebrane dane zamodelowano wszystkie duże jednostki generacyjne centralnie sterowane w KSE, wraz z niezbędną automatyką do przeprowadzenia badań procesów przejściowych.

W zamodelowanym systemie dodano również model automatyki SCO. Dobrano nastawy zgodnie z tabelicą 1. Dla każdego z odbiorów zamodelowano 5 stopni samoczynnego automatycznego odciążenia. Stopień odciążenia określono na podstawie nastaw automatyki SCO i obciążenia stacji w danej chwili, jednakże należy mieć na uwadze, iż chwila ta była określona w bazie kdm jako obciążenie szczytowe, zatem takie rozwiązanie nie stanowi błędu.

3.2. Podział KSE, wydzielenie obszaru północno-zachodniego

Dla potrzeb wykonanych badań symulacyjnych działania automatyki SCO zamodelowano awarię, która doprowadziła do podziału KSE. Wydzielony został obszar północno-zachodni oznaczony jako obszar NW (ang. *North-West*) – w skład, którego wchodzi stacje takie jak: Dychów, Gorzów, Poznań, Piła, Żydowo, Słupsk. Część połączeń sieciowych z analizowanym obszarem jest wyłączona na stałe, są to głównie połączenia na napięciu 110kV pomiędzy różnymi OSD. W przyjętym scenariuszu awarii systemowej, powodującej wydzielenie obszaru NW, założono wyłączenie 9 linii 110 kV, 4 linii 220 kV i 3 linii 400 kV. Wyłączenia następowały wskutek przyjęcia stanów remontowych, przeciążenia linii, stanów awaryjnych. Jedyną linią łączącą badany obszar NW z resztą KSE pozostała linia 400 kV łącząca stacje elektroenergetyczne w Żarnowcu i Słupsku. W wyniku jej wyłączenia nastąpiło wydzielenie obszaru NW.

Na skutek podziału w obu systemach wystąpiło niezbilansowanie mocy generowanej z pobieraną. W przypadku obszaru NW, wystąpiła znacząca nadwyżka mocy odbieranej nad mocą generowaną. Z badań wynika, że wartość deficytu mocy sięga 600 MW, co stanowi blisko 1/3 część mocy generowanej na tym obszarze w chwili wystąpienia podziału. W przypadku pozostałej części KSE

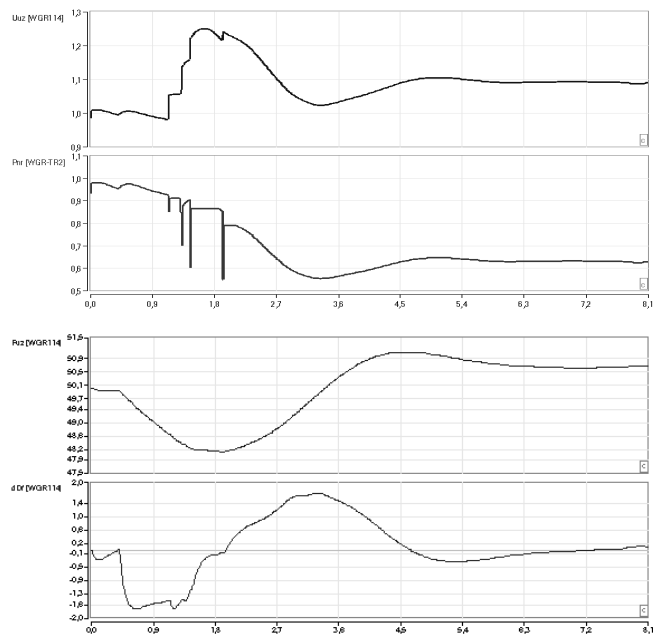
pojawiła się nadwyżka generacji o ok. 300 MW, co stanowiło mniej niż 1% łącznej mocy zapotrzebowanej.

Przeprowadzone badania statyczne stanowią podstawę do obliczeń długookresowych stanów przejściowych. W badaniach dynamicznych w chwili czasowej $t = 0,4$ s zamodelowano podział systemu, poprzez odłączenie ostatniej linii łączącej oba podsystemy (awaryjne odłączenie linii N004).

3.3. Wybrane wyniki badań długookresowych stanów przejściowych

W pierwszej symulacji sprawdzono zadziałanie automatyki SCO, przy zamodelowanej awarii. Współczynnik wykorzystania SCO wynosił 1, temperaturę ustalono na $+5^{\circ}\text{C}$, a prędkość wiatru na 10 m/s. Obliczenia przeprowadzono przy zmiennej częstotliwości, z uwzględnieniem sekwencji zdarzeń, charakterystyk statycznych oraz automatyki SCO. W wyniku badań uzyskano przebiegi parametrów systemu w funkcji czasu (rysunek 1).

Z przebiegów przedstawionych na Rys. 1 wynika, że częstotliwość osiąga wartość ustaloną w chwili $t = 1,95$ s, w której osiągnęła poziom ok. 48,15 Hz, co jest częstotliwością zbliżoną do 47,5 Hz, czyli częstotliwości granicznej. Proces spadku częstotliwości nastąpił po upływie 1,5 s, od wystąpienia wydzielenia obszaru, natomiast sam stan nieustalony trwał ok. 7,5 s. Po ustaniu stanów przejściowych częstotliwość osiągnęła poziom 50,69 Hz, co oznacza zbyt głębokie odciążenie obszaru. Z analizy wykresu napięcia na szynach jednego z węzłów w obszarze północno-zachodnim wynika, że wartość napięcia skokowo rośnie wraz z każdym kolejnym skokowym odciążeniem przez automatykę SCO.

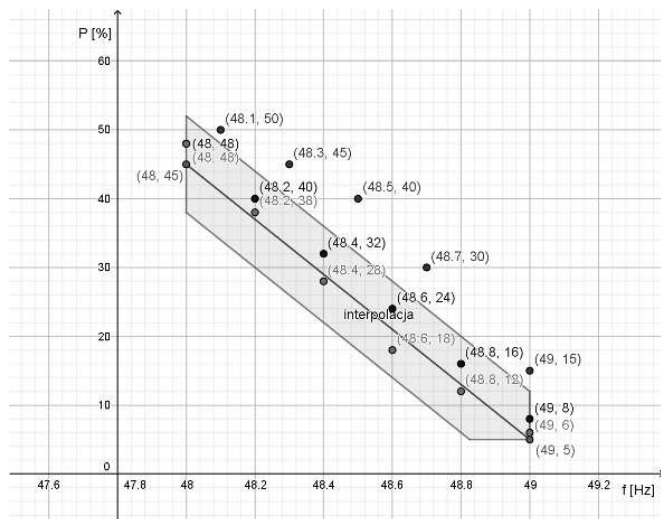


Rys. 1. Wyniki badań: $U(t)$, $P(t)$, $f(t)$, $df(t)$.

Wyłączenie pierwszego stopnia obciążenia, czyli zmniejszenie poboru mocy przez odbiór do $0,85P_n$, spowodowało skokowy wzrost napięcia o ponad $0,05U_n$. W ten sposób w stanie nieustalonym, wartość chwilowa napięcia wzrastała aż do wartości $1,25U_n$. Ze względu na zamodelowane charakterystyki statyczne odbiorów, gwałtowny skok napięcia powoduje wzrost mocy czynnej pobieranej przez odbiór. Na skutek zadziałania pierwszego

stopnia automatyki wartość mocy względnej odbioru spadła z 94,3% do nastawionych 85%, jednakże w związku ze skokowym wzrostem napięcia, wartość mocy także wzrosła i przed zadziałaniem kolejnego stopnia, ustabilizowała się na poziomie 92,7%. Oznacza to, iż rezultat odciążenia przy pierwszym stopniu SCO jest nieznaczny. Jednakże udaje się spowolnić spadek częstotliwości. Po załączeniu ostatniego stopnia automatyki SCO, udało się zmniejszyć obciążenie względem początkowego do 79%. Wartość ta utrzymała się na stałym poziomie aż do momentu gdy pochodna częstotliwości osiągnęła wartość $0,5$ Hz/s, wówczas odbudowująca się częstotliwość spowodowała, że wartość P maleje i dąży do wartości 55% zadanej przez nastawy automatyki SCO, jednakże ze względu na charakterystyki statyczne osiąga 63%. Wynika to z faktu, że ustabilizowane napięcie wynosi 110% napięcia nominalnego, a częstotliwość 50,69 Hz, co również jest wartością wyższą od znamionowej.

W celu zbadania działania automatyki SCO o różnych nastawach, zamodelowano automatykę SCO zgodną z nastawami aktualnie występującymi w (tablica 1) oraz dwie inne spełniającą wymogi NC ER (tablica 2). Zestaw nastaw dla wszystkich trzech przedstawiono na Rys. 2.

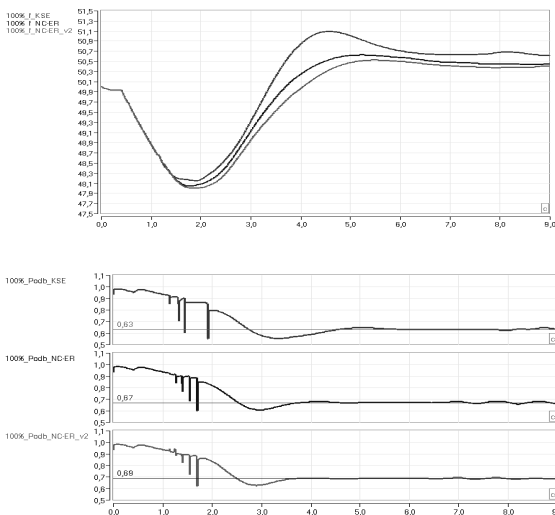


Rys. 2. Zakres wdrażania dla obszaru synchronicznego Europy kontynentalnej wraz z naniesionymi aktualnymi nastawami automatyki SCO w KSE (czerwone punkty)

Wyniki badań przedstawiono w formie przebiegów częstotliwości oraz obciążenia (Rys. 3). Z wykresu częstotliwości widać, że nastawy zgodne z NC ER spowodowały w przypadku badanej awarii głębsze zapady częstotliwości 48,01 (przebieg zielony) i 48,05 Hz (przebieg niebieski), jednakże mniejsze oscylacje, choć czas trwania stanu nieustalonego jest dłuższy. Częstotliwość ustabilizowała się na poziomach 50,40 (przebieg zielony) oraz 50,45 Hz (przebieg niebieski), co świadczy o pewnej nadwyżce generacji nad obciążenie, zatem część odbiorów można z powrotem podłączyć do sieci. Nastawy dla SCO aktualnie stosowane w polskim KSE spowodowały w analizowanej sytuacji znaczące oscylacje (maksymalna wartość chwilowa częstotliwości osiąga poziom 51,1 Hz). Zapad częstotliwości został powstrzymany na poziomie 48,16 Hz, a wartość w stanie ustalonym po awarii wyniosła 50,64 Hz.

W przypadku nastaw automatyki SCO aktualnie występujących w polskim KSE zadziałały 4 stopnie

odciążenia, co daje 45% odłączonej mocy, natomiast przy europejskich nastawach odciążenie wyniosło 40% (niebieski) i 38% (zielony) w obu przypadkach złożyło się na nie 5 stopni automatyki SCO. W każdym z wariantów uzyskane rzeczywiste odciążenie było mniejsze niż wynikające z nastaw automatyki. W wariancie z nastawami SCO adekwatnymi do obecnych w polskim KSE finalne obciążenie wynosiło 63% stanu sprzed awarii, a w wariantach z nastawami zgodnymi z europejskimi normami 67% (niebieski) i 69% (zielony). Wszystkie automatyki spełniły swoje zadanie uratowania wydzielonego obszaru od awarii katastrofalnej, jednakże automatyka SCO z nastawami zgodnymi z NC ER, uczyniła to mniejszym kosztem odciążania systemu. Porównując zestawy nastaw zgodnych z europejskim kodeksem sieci NC ER korzystniej wypada automatyka SCO z mniejszym odciążaniem na pierwszych stopniach niż przy równomiernym rozłożeniu odciążenia pomiędzy stopnie. Zastosowanie mniejszej wartości odciążenia na pierwszych stopniach, ma też uzasadnienie ze względów ekonomicznych. Częściej występują niewielkie zapady częstotliwości, zatem aby zrównoważyć niebilansowanie wystarczy początkowo odłączyć niedużą część obciążenia.



Rys. 3 Przebiegi $f(t)$ i $P_{wzg}(t)$ [WGR-TR2] – dla różnych nastaw SCO

4. WNIOSKI

- Automatyka SCO, stanowi ostatnią linię obrony SE, zatem trudno zweryfikować poprawność jej działania i zasadność jej nastaw. Z tego względu korzystne mogą okazać się symulacje komputerowe, pozwalające na

przeprowadzenie dowolnego scenariusza zdarzeń, bez ryzyka uszkodzenia maszyn i urządzeń elektroenergetycznych.

- Wystąpienie znaczącego (powyżej 1 Hz) zapadu częstotliwości w dużym SE (np. polski KSE) jest praktycznie niemożliwe. Jednakże automatyka SCO, może uratować fragmenty SE, odizolowane od reszty na skutek awarii.
- W związku z wejściem w życie nowych regulacji prawnych – Kodeks NC ER, należy zmienić nastawy automatyki SCO w polskim SE. Zgodnie z zapisami kodeksu sieci NC ER, względem obecnych nastaw, należy dodać przynajmniej jeden stopień odciążenia oraz zniwelować zwłoki czasowe z nastaw końcowych stopni.
- Dla zasymulowanej awarii systemowej, nastawy zgodne z kodeksem NC ER, okazały się skuteczniejsze niż obecnie przyjęte w KSE.

5. BIBLIOGRAFIA

1. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) 2017/2196 z dnia 24 listopada 2017 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący stanu zagrożenia i stanu odbudowy systemów elektroenergetycznych. L312/53 Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej (PL), 28.11.2017.
2. Manual programu DAKAR, ELEKS Software Company, Lwow 2014.
3. <https://dakar.eleks.com>
4. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci zatwierdzona decyzją Prezesa URE nr DPK-4320-1(4)/2011/LK z dnia 15 grudnia 2011 r, Tekst obowiązujący od: 1 grudnia 2011 r.
5. J. Handke, B. Olejnik, A. Schott, "Algorytmy samoczynnego częstotliwościowego odciążania w świetle obowiązujących rozporządzeń Komisji Europejskiej", Przegląd Elektrotechniczny nr 2/2019 r, str. 7-10.
6. B. Gajewski, A. Stawowy, Z. Śmiech, "Przygotowanie bazy danych w formacie programów obliczeniowych PPS/E i PSLF dla obliczeń równowagi dynamicznej dla krajów grupy centrel", Warszawa 1996
7. Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", New York 2005
8. P. Pourbeik, "Model User Guide for Generic Renewable Energy System Models", Palo Alto 2015

SIMULATION TESTS OF THE DEFENSE PROCESS OF THE POWER SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT THE PROVISIONS OF THE NC ER / 2017 CODE IN THE FIELD OF UFLS AUTOMATION

In the defense plan of the power system, in the event of a sudden imbalance related to the lack of generative power, the automatic Under Frequency Load Shedding (UFLS) is used as the basic means of defense. Each TSO concerned by NC ER/2017 is required to develop in its defense plan UFLS automation that meets the guidelines specified in the Code. In the simulation tests conducted using the DAKAR program, the UFLS automation was modeled in accordance with the NC ER/2017 guidelines and the current IRiESP requirements. The separated area concerned the northern part of the National Power System with a large imbalance and sudden drop in frequency. Based on the research, the advantages of NC ER / 2017 recordings were indicated.

Keywords: blackout, defense of the power system, UFLS automation, simulation research of the defense process.