

## **WPŁYW WYMAGAŃ OKREŚLONYCH W KODEKSIE SIECI DLA PRZYŁĄCZANIA JEDNOSTEK WYTWÓRCZYCH, A W SZCZEGÓLNOŚCI WYMAGANIA POZOSTANIA W PRACY PODCZAS ZWARCIA, NA PRZEPIĘCIA GENEROWANE W OBWODZIE WIRNIKA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO**

**Mariusz MAZUR**

Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk  
tel.: 58 349-81-20 e-mail: m.mazur@ien.gda.pl

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono wymagania dla bloków wytwórczych wynikające z kodeksu sieci, dotyczącego wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych, uchwalonego rozporządzeniem Komisji Europejskiej w kwietniu b.r.. Omówiono zawartość tego kodeksu, klasyfikację jednostek wytwórczych z niego wynikających oraz wymogi stawiane poszczególnym ich typom, a także wynikające z niego implikację dla systemów wzbudzenia generatorów synchronicznych dużych mocy. Szczegółowej analizie poddano, wymaganie pozostania w pracy podczas zwarcie konwencjonalnego bloku wytwórczego dużej mocy. Wymaganie to jest najtrudniejszym wymaganiem, a analiza dotyczyła wpływu tego wymagania na rozwiązania techniczne systemów wzbudzenia. Przedstawiono także propozycję rozwiązań technicznych tychże systemów, umożliwiające spełnienie wymagań kodeksu.

**Słowa kluczowe:** Network Code, RfG Układ wzbudzenia, przepięcia w wirniku generatora synchronicznego.

### **1. WPROWADZENIE**

W XXI wieku w europejskim systemie elektroenergetycznym nastąpił dynamiczny rozwój źródeł wytwórczych generacji odnawialnej i rozproszonej. Coraz częściej zdarza się, że w niektórych krajowych systemach energetycznych, przyłączonych do UCTE (Union for the Coordination of the Transmission of Electricity) generacja odnawialna stanowi większość produkowanej energii. Sytuacja ta powoduje szereg problemów w sieci elektroenergetycznej, związanych z dwukierunkową transmisją energii w sieciach dystrybucyjnych oraz regulacyjnością systemu. Przyjęta dotychczas polityka pracy systemów elektroenergetycznych, opierająca się na dużych jednostkach wytwórczych, zapewniających zachowanie parametrów regulacyjnych systemu (częstotliwości i napięcia), a także spełnienia wszelkich wymagań pozwalających na prawidłowe działania zabezpieczeń i układów automatyki, wobec tych okoliczności musi ulec zmianie. Odnotowano już wiele mniejszych lub większych awarii systemowych, do których w istotny sposób przyczyniła się generacja rozproszona. Generacja ta instalowana była początkowo bez szczególnych wymagań, w związku z małą mocą przyłączeniową pojedynczej instalacji. Konieczne stało się zatem

zdefiniowanie wspólnych europejskich wymagań, między innymi wymagań dla jednostek wytwórczych. Naturalnym koordynatorem tych wymagań stało się ENTSOE (European Network of Transmission System Operators for Electricity) zrzeszające operatorów systemów przesyłowych oraz ACER (Agency for the Cooperation of Energy Regulators) zrzeszające europejskie urzędy regulacji.

Od kilku już lat, w oparciu o dyrektywę 2009/72/EC Parlamentu i Komisji Europejskiej dotyczącej wspólnej polityki rynku energii elektrycznej oraz rozporządzenie nr 714/2009 z 13.07.2009 r o warunkach dostępu do sieci i wymiany międzynarodowej, prowadzone były intensywnie prace na wdrożeniu wspólnych wymagań zwanych KODEKSAMI SIECIOWYMI. Wymagania te dotyczą wielu aspektów pracy systemu elektroenergetycznego, jednak w niniejszym artykule analizowano szczegółowo jedynie wymagania dotyczące źródeł wytwórczych. Zdefiniowane są one w ROZPORZĄDZENIU KOMISJI (UE) ustanawiającym kodeks sieciowy, dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci [1].

### **2. WYMAGANIA ZAWARTYCH W KODEKSIE DOTYCZĄCY WYMOGÓW W ZAKRESIE PRZYŁĄCZENIA JEDNOSTEK WYTWÓRCZYCH DO SIECI.**

Szczegółowe wymagania stawiane poszczególnym JW (jednostkom wytwórczym) zależne są od grupy do której dana jednostka przynależy.

Kodeks sieciowy wprowadza pojęcie „Modułu Wytwarzania Energii”, i poszczególne moduły klasyfikuje w zależności od mocy i napięcia przyłączeniowego, moduł oznacza synchroniczny moduł wytwarzania energii (generator synchroniczny) lub niepodzielną grupę generatorów (np. pracujących na jednym wale) lub „Moduł Parku Wytwarzania Energii” co odnosi się, do urządzeń podłączonych synchronicznie lub niesynchronicznie poprzez przekształtniki energoelektroniczne.

#### **2.1. Podział modułów wytwórczych.**

Moduły wytwórcze poszczególnych grup podzielone zostały na cztery typy A, B, C i D w zależności od ich mocy oraz poziomu napięcia przyłączeniowego, przy czym

najmniejsze moduły oznaczono typem A natomiast największe typem D. Najmniejsze wymagania stawiane są modułom typu A, a największe modułom typu D. Wymagania są w większości tak podzielone, że dla kolejnego typu jednostek obowiązują wymagania z poprzednich typów; zatem wymagania z typu A obowiązują dla typów B,C i D, wymagania z typu B obowiązują dla typów C i D itp.

W tabeli 1 przedstawiono ogólne zestawienie klasyfikacji poszczególnych typów JW oraz podsumowano wymagania przypisane tym typom.

Dodatkowo kodeks sieciowy definiuje szczegółowe wymagania dla tzw. modułów synchronicznych, czyli JW opartych o generatory synchroniczne, oczywiście tylko takie JW posiadają układy wzbudzenia regulujące napięcie i moc bierną, poprzez zmiany prądu w uzwojeniu wzbudzenia. Urządzenia te są przedmiotem analizy opisaną w niniejszym artykule.

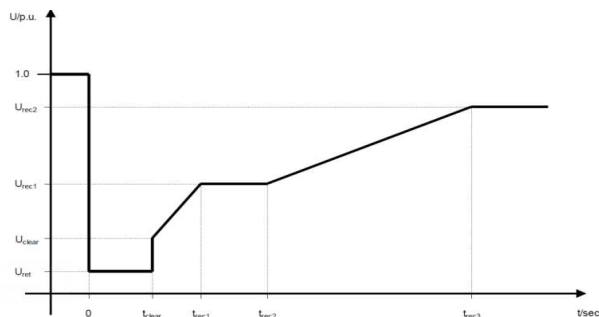
Tabela 1. Wymagania stawiane poszczególnym typom JW.

TYP	Moc JW	Napięcie sieci	Wymagania
A	większa równa 0,8 kW	niższe od 110kV	<ul style="list-style-type: none"> <li>Podstawowy poziom wymagań</li> <li>Ograniczony zakres regulacji wytwarzania przez OS</li> </ul>
B	większa równa 1 MW	niższe od 110kV	<ul style="list-style-type: none"> <li>Szerszy poziom automatycznej regulacji (w stosunku do JW typu A)</li> <li>Łagodzenie krytycznych zdarzeń systemowych</li> </ul>
C	większa równa 50 MW	niższe od 110kV	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proces wytwarzania kontrolowany w czasie rzeczywistym</li> <li>Świadczenie usług systemowych</li> <li>Zapewnienie bezpieczeństwa dostaw energii</li> <li>Przeciwdziałanie i eliminacja występujących zdarzeń krytycznych</li> </ul>
D	większa równa 75 MW	niższe od 110kV	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stabilne działanie połączonych systemów elektroenergetycznych.</li> <li>Wykorzystanie usług systemowych świadczonych przez dowolne JW w Europie.</li> </ul>
	niezależnie od mocy	wyższe równie 110kV	

## 2.2. Określenie wpływu wymagań zawartych w kodeksie na pracę układu wzbudzenia

W trakcie uzgadniania treści końcowej kodeksu sieciowego, nastąpiło dosyć istotne ograniczenie szczegółowych wymagań stawianych systemom wzbudzenia, w porównaniu do pierwszego draftu kodeksu ogłoszonego 22 marca 2011 roku. Pomimo tego, w ostatecznej wersji kodeksu sieciowego również znalazło się kilka nowych uwarunkowań dla tych systemów wzbudzenia. Oprócz wymagań szczegółowych określonych w artykule 19 kodeksu, określających funkcje jakie układ wzbudzenia winien spełniać, które zasadniczo pokrywają się z dotychczasowymi wymaganiami zawartymi w IRiESP [2], znalazły się wymagania określające możliwość pracy w poszerzonym zakresie napięć i częstotliwości, co technicznie nie powinno stanowić problemu dla współczesnych systemów wzbudzenia. Podstawowym jednak nowym wymaganiem, istotnym z punktu widzenia wszelkich układów elektrycznych bloku, jest wymóg pozostania w pracy JW, podczas ściśle zdefiniowane profilem prądowo czasowym, zwarcia. Oznacza to konieczność dokładnego przeanalizowania parametrów i algorytmów wszelkich urządzeń, których praca jest konieczna dla utrzymania jednostki wytwórczej w pracy.

Wymagania stawiane generatorom synchronicznym typu D, a w tej grupie znajdują się konwencjonalne jednostki wytwórcze posiadające statyczne układy wzbudzenia, nakładają ściśle określone parametry napięć i czasów dla danego na (Rys. 1) profilu napięcia występującego w czasie zwarcia. Parametry te przedstawiono w tabelicy 2.



Rys. 1. Profil zwarcia dla którego moduł wytwarzania energii winien pozostać w pracy.

Tabela 2. Wymagania stawiane poszczególnym typom JW.

Parametry napięcia [pu]		Parametry czasu [s]	
$U_{ret}$	0	$t_{clear}$	0,14-0,25
$U_{clear}$	0,25	$t_{rec1}$	$t_{clear}-0,45$
$U_{rec1}$	0,5 – 0,7	$t_{rec2}$	$t_{rec1}-0,7$
$U_{rec2}$	0,85-0,9	$t_{rec3}$	$t_{rec2}-1,5$

Wymaganie pozostania w pracy podczas zwarcia, definiuje przebieg napięcia i czas jego trwania, w punkcie przyłączenia, które JW powinna przejść bez wyłączenia się, jest to wymaganie przeniesione z wymagań dla generacji wiatrowej, w której energoelektronika pozwala często na ograniczenie prądów zwarciovych generatorów, same zaś maszyny mają maksymalne moce rzędu kilku MW. Odpowiedź na pytanie czy wymaganie takie może być w ogóle spełnione przez duże generatory synchroniczne tej mocy, nie jest tematem niniejszego artykułu, autor koncentruje się na zagadnieniach związanych z systemami wzbudzenia.

## 3. BADANIA MODELOWE ZACHOWANIA SIĘ DUŻEGO GENERATORA Z PUNKTU WIDZENIA UKŁADU WZBUDZENIA.

W celu badania zachowania się dużego generatora synchronicznego opracowano model połączenia generatora z siecią sztywną poprzez transformator blokowy. Dla celów symulacji przyjęto generator typu 50WT25E-158 produkcji firmy Alstom o mocy 1127,1MVA [7]. Generatory tego typu pracować będą na blokach 5 i 6 Elektrowni Opole. Przebieg zwarcia modelowany był poprzez zmianę parametrów sieci sztywnej. Badania modelowe przeprowadzono za pomocą programu PSCAD. Program ten umożliwia dokładne modelowanie trójfazowe generatora oraz elementów elektroniki odpowiadających za układ wzbudzenia. Model układu wzbudzenia oparty był o model IEEE ST1 [8], i miał funkcję przejścia zdefiniowaną wzorem (1).

$$\frac{780 \cdot (1 + 2s)}{1 + 20s} \quad (1)$$

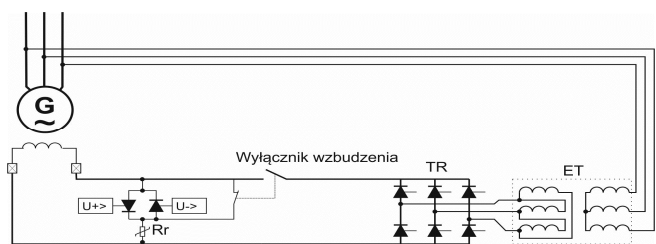
Sygnal wyjściowy układu regulacji napięcia sterował dokładnym modelem prostownika tyrystorowego zasilanym poprzez transformator wzbudzenia bocznikowo z zacisków

generatora. W trakcie badań, koncentrowano się na stanach przejściowych, w obwodzie wirnika generatora, związanych z pozostaniem JW. W pracy podczas zwarcia którego profil określony jest w [1].

### 3.1. Model zachowania się dużego generatora z punktu widzenia układu wzbudzenia.

Zgodnie z zasadą stałości skojarzeń magnetycznych w momencie zwarcia, bądź przetężenia prądowego, skojarzenia magnetyczne strumienia wzbudzenia, skojarzone z uzwojeniami poszczególnych faz stojana, nie mogą ulec skokowej zmianie. W czasie zwarcia, w zwartych fazach stojana płyną prądy, które podtrzymują wartości strumieni skojarzonych z ich uzwojeniami. Uzwojenie wirnika jest zamknięte i podlega również zasadzie ciągłości skojarzeń magnetycznych. Oznacza to, że wskutek zwarcia powstają w nim prądy wytwarzające takie strumienie, które łącznie kompensują strumienie składowych zgodnych i aperiodycznych występujących w stojanie. Wiąże się to z zaindukowaniem się w uzwojeniu wzbudzenia przeciwnego napięcia, które wymusi przepływ prądu. Ponieważ prąd ten jest w czasie zwarcia kilkakrotnie większy od prądu znamionowego wirnika, wartość napięcia indukującego się w wirniku jest zależna od parametrów obwodu, przez który prąd zwarcia musi się zamknąć. Przepięcie to wyzwala układ od przepięć w wirniku, co zabezpiecza wirnik przed uszkodzeniem jego izolacji. Szczegółowe wyjaśnienie tych zjawisk można znaleźć w literaturze: [4],[5],[6].

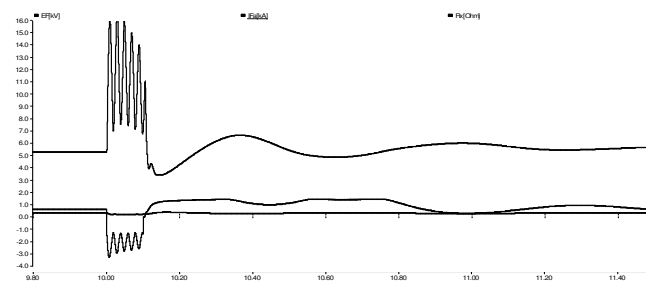
Aby zapobiec nadmiernemu przepięciu indukującemu się w uzwojeniu wirnika w czasie zwarcia, stosuje się zabezpieczenia od przepięć w obwodzie wirnika (w nazewnictwie angielskim używa się pojęcia Crowbar). Zabezpieczenie to składa się z dwóch antyrównolegle połączonych tyrystorów, które wraz z szeregowym opornikiem rozładowczym podłączone są do uzwojenia wzbudzenia. W czasie zwarcia na stojanie, powodującego gwałtowny wzrost prądu wzbudzenia, odpowiedni tyrystor zabezpieczenia jest załączany, zwierając uzwojenie wzbudzenia małą, zwykle nieliniową, rezystancją, niedopuszczając w ten sposób, do nadmiernego wzrostu napięcia w obwodzie wirnika. Schemat poglądowy statycznego systemu wzbudzenia, wraz z układem zabezpieczenia od przepięć pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Typowy schemat statycznego układu wzbudzenia

Wzbudzenie generatora synchronicznego zasilane jest z prostownika tyrystorowego TR, poprzez transformator wzbudzenia ET, który dopasowuje napięcie do wymaganego poziomu napięcia wzbudzenia. Układ zabezpieczenia od przepięć w wirniku podłączony jest za wyłącznikiem wzbudzenia, bezpośrednio na uzwojeniu wzbudzenia. W zależności od kierunku przepięcia załączany jest tyrystor  $U \rightarrow$  lub  $U \leftarrow$ . Ponieważ przepięcia związane ze zvarciami lub przetężeniami prądowymi w stojanie, mają znak

przeciwny do napięcia wzbudzenia, dla analizowanych w artykule przypadkach, działa zabezpieczenie w kierunku ujemnym  $U \leftarrow$ . Pokazuje to rys 3, na którym przedstawiono przebiegi prądu i napięcia wzbudzenia w chwili 3 fazowego zwarcia za transformatorem blokowym. W czasie zwarcia w uzwojeniu wirnika indukuje się prąd o 3 – 4 krotnie większej amplitudzie od prądu znamionowego wirnika. W uzwojeniu wzbudzenia indukuje się przepięcie, powodujące działanie układu zabezpieczenia od przepięć w wirniku, a jego wartość zależy od rezystancji rozładowczej  $R_r$  (rys 2). Rezystancję tę dobiera się tak, aby w chwili przetężenia nie doszło do uszkodzenia wirnika, a jednocześnie aby nastąpiło jak najszybsze rozładowanie energii pola wirnika w czasie odwzbudzenia awaryjnego. W analizowanym przypadku, po wyłączeniu zwarcia generator wraca do pracy.



Rys. 3. Zwarcie 3 fazowe za transformatorem blokowym. Przebiegi w obwodzie wzbudzenia generatora, prądu (górny przebieg) i napięcia wzbudzenia (dolny przebieg).

Działanie zabezpieczenia od przepięć w obecnych rozwiązaniach systemów wzbudzenia, zwykle powoduje natychmiastowe wysłanie sygnału na wyłączenie generatora do zabezpieczeń elektrycznych. Taka logika działania, sprawdzała się do chwili wejścia w życie nowych kodeksów sieciowych.

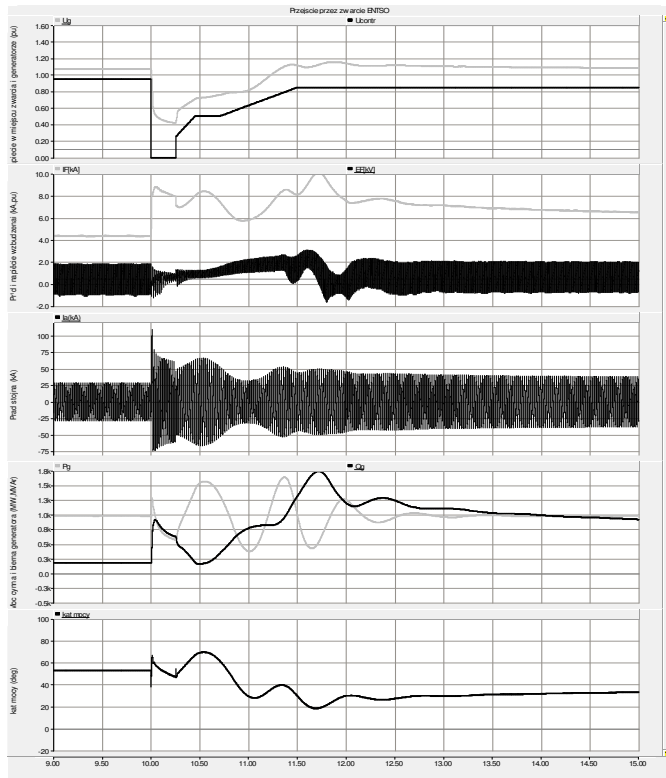
### 3.2. Badania modelowe wymagań określonych w kodeksie sieciowym, o przyłączaniu jednostek wytwórczych.

Aby określić jak spełnić wymogi kodeksu o przyłączaniu JW, przeprowadzono badania, których wyniki pokazane są na rys 4. Wymagany profil zwarcia został zamodelowany za pomocą charakterystyki czasowej sieci sztywnej, w miejscu przyłączenia, jest to pokazane na pierwszym wykresie rys 4 (krzywa szara), profil ten przekłada się na napięcie na zaciskach generatora, pokazanym na tym samym wykresie (krzywa czarna), napięcie to zależne jest od tzw. reaktancji zewnętrznej, będącej sumą reaktancji transformatora blokowego i linii zasilającej. Wartości tych reaktancji oraz przekładnia napięciowa transformatora wzbudzenia, ma decydujące znaczenie dla utrzymania stabilności kątowej generatora w trakcie zwarcia. Na kolejnych wykresach pokazane są wielkości fizyczne opisujące stan pracy generatora w czasie symulacji. W modelu nie uwzględniono ograniczników regulatora napięcia, które nie dopuściły by do tak znacznego wzrostu mocy biernej w końcowej części profilu zwarcia. Przedmiotem analiz nie była jednak stabilność kątowa a badanie zjawiska przepięć w wirniku.

Wyniki symulacji wskazują że może dojść do pobudzenia się zabezpieczenia od przepięć w wirniku, jest to w przypadku praktycznie wszystkich producentów układów wzbudzenia zabezpieczenie działające autonomicznie i powodujące natychmiastowe zwarcie wirnika, to działanie zabezpieczenia musi pozostać, gwarantuje ono bowiem

bezpieczeństwo uzwojenia wzbudzenia, które w innym wypadku w czasie zwarcia uległoby uszkodzeniu na skutek przecroczenia wytrzymałości napięciowej uzwojenia.

Modyfikacji należy poddać algorytmy wyłączające JW, od działania zabezpieczenia od przecięć w wirniku. Ponieważ w przypadku tego typu zwarć, działa zawsze tyrystor ujemny (rys 2), po ustąpieniu zwarcia, nastąpi jego samoczynne wyłączenie poprzez prostownik wzbudzenia. Aby nie dopuścić do generacji zbędnego sygnału na wyłącz należy wprowadzić dodatkowe opóźnienie czasowe 300 ms, przy generacji rozkazu na wyłącz do systemu zabezpieczeń elektrycznych generatora od ujemnego przecięcia w wirniku.



Rys. 4. Zwarcie zgodne z profilem kodeksów sieciowych, przebiegi parametrów generatora.

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Kodeks o przyłączaniu JW wprowadza nowe wymagania dla modułów wytwórczych. Wymaganie

pozostania w pracy podczas zwarcia, jest w przypadku dużych generatorów ogromnym wyzwaniem. Dotyczy to także w szczególności układu wzbudzenia oraz sposobu działania układu zabezpieczenia od przecięć. Każdy nowy blok wytwórczy będzie wymagał przeprowadzenia szczegółowych analiz, oraz indywidualnego określenia parametrów doboru obwodów pierwotnych po kątem spełnienia kodeksu sieciowego. Będzie to zapewne wiązało się z określeniem minimalnych reaktancji pomiędzy generatorem a punktem przyłączenia, ale także przekładną transformatora wzbudzenia, zapewniająca zachowanie stabilności kątowej generatora w czasie zwarcia, co samo w sobie jest zagadnieniem niezwykle trudnym do spełnienia. Z punktu widzenia układu wzbudzenia, wymagana będzie zmiana logik działania układów zabezpieczenia od przecięć w wirniku. Układy te nie będą mogły generować sygnału na wyłącz w czasie zwarcia, należy tu zauważyć że wymagane 250 ms zwarcia w chwili początkowej to przeszło dwa razy dłuższy czas niż rozważany obecnie. Badania opisywane w artykule oraz wnioski z nich płynące są elementem opracowywanych w Gdańskim Oddziale Instytutu Energetyki nowych algorytmów systemów wzbudzenia pracujących w kraju i za granicą.

#### 5. BIBLIOGRAFIA:

1. <http://eur-lex.europa.eu/> Rozporządzenie Komisji Europejskiej 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci.
2. [www.pse.pl](http://www.pse.pl) Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Wersja 2.0 1 stycznia 2012
3. Kundur, P "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994.
4. Machowski J., „Regulacja i Stabilność Systemów Elektroenergetycznych”, Warszawa 2007.
5. Latak W: „Turbogeneratory” Wydawnictwo Naukowo Techniczne Warszawa 1973
6. Przybysz J., „Turbogeneratory zagadnienia eksploatacyjne”, Warszawa 2003.
7. Alstom: „Dane Techniczne Generatora 50WT25E-158 ze Statycznym Układem Wzbudzenia”
8. IEEE P421.5/D15 Recommended Practice for Excitation System Models For Power System Stability Studies

### THE IMPACT OF THE "ENTSO-E NETWORK CODE" REQUIREMENTS, ESPECIALLY FAULT-RIDE-THROUGH CAPABILITY, FOR THE OVERVOLTAGES IN THE EXCITATION CIRCUIT OF SYNCHRONOUS GENERATORS

**Abstract:** This article presents issues related with the European Commission Regulation establishing a Network Code for Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators. Paper presents the content of this Network Code, especially classifications of Power Generation Modules and the requirements for their individual types. Especially analyzed the impact of this requirements for the excitation systems of high power synchronous generators. Simulation analysis concerned on the impact of fault-ride-through capability requirement, on rotor crowbar circuit of the excitation systems of synchronous generators. This kind of fault could cause overvoltage in the rotor and excitation system crowbar operation. Most of existing excitation systems, immediately trip the unit in this case. The article presents suggestions for technical solutions, enabling the fulfillment of this requirement. Fault-ride-through capability requirement is the most difficult requirement to fulfill by Power Generation Modules, and will require modification on design rules for Power Generators, their auxiliary systems, including the hardware and software scope of the excitation systems.

**Keywords:** Network Code RfG, Excitation system, overvoltage in the synchronous generator rotor.