

XVI Międzynarodowa Konferencja Naukowa

AKTUALNE PROBLEMY W ELEKTROENERGETYCE APE'13

Jurata, 12-14 czerwca 2013

Referat nr 15

ESTYMACJA WYBRANYCH PARAMETRÓW MODELU GENERATORA SYNCHRONICZNEGO Z WYKORZYSTANIEM METODY GRADIENTOWEJ – REFERAT KONFERENCYJNY

Zbigniew LUBOŚNY<sup>1</sup>, Jacek KLUCZNIK<sup>2</sup>, Krzysztof DOBRZYŃSKI<sup>3</sup>

1. Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej  
tel: 58 3471641 fax: 58 347 1898 e-mail: z.lubosny@ely.pg.gda.pl
2. Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej  
tel: 58 3471798 fax: 58 347 1898 e-mail: j.klucznik@ely.pg.gda.pl
3. Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej  
tel: 58 3471798 fax: 58 347 1898 e-mail: k.dobrzynski@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** Referat prezentuje metodę estymacji parametrów modelu generatora synchronicznego z wykorzystaniem algorytmu gradientowego. Przedstawiono przykład estymacji parametrów modelu hydrogeneratora w oparciu o przebiegi napięcia generatora podczas dwóch testów: zrzutu mocy czynnej i zrzutu mocy biernej. Prezentowane analizy zostały wykonane w autorskim programie wykorzystującym środowisko modelowania PowerFactory firmy DlgSILENT.

**Słowa kluczowe:** estymacja, model generatora synchronicznego, metoda gradientowa.

## 1. WSTĘP

Badania zachowania się systemu elektroenergetyczne po wystąpieniu zaburzeń przeprowadzane są na modelu systemu w przeznaczonych do tego programach obliczeniowych. O jakości uzyskanych wyników decyduje dokładność modeli oraz prawidłowe wartości parametrów tych modeli. Sposoby pozyskania wartości parametrów modeli mogą być różne. Wybrane parametry można wyznaczyć na drodze analitycznej. Podstawowym sposobem dla pozostałych jest pozyskanie ich wartości od producenta. To może być z jednej strony trudne, a drugiej strony (jeżeli przyjmuje się określony, uproszczony model) nie dla każdego parametru modelu możliwe. W takim przypadku dobrym sposobem pozyskania wybranych parametrów jest ich estymacja na podstawie porównania odpowiednich sygnałów uzyskanych z obiektu rzeczywistego oraz z modelu. W niniejszym artykule przedstawiono estymację wybranych parametrów modelu dynamicznego generatora synchronicznego, gdzie w procesie estymacji wykorzystano metodę gradientową.

## 2. PRZYJĘTA PROCEDURA ESTYMACJI

Estymacja parametrów modelu matematycznego na podstawie odpowiedzi obiektu rzeczywistego, tj. identyfikacja dynamiki systemu realizowana jest poprzez porównywa-

nie odpowiedzi obiektu rzeczywistego z odpowiedzią modelu, którego parametry podlegają estymacji. W procesie tym, na drodze automatycznej dobiera się estymowane parametry tak, aby odpowiedź modelu była jak najbliższa odpowiedzi obiektu rzeczywistego. Miarą różnicy odpowiedzi modelu i obiektu jest pewna funkcja skalarna. Dość powszechnie stosowaną funkcją jest suma kwadratów odległości pomiędzy odpowiedziami modelu i obiektu:

$$F(\mathbf{X}) = \sum_{t=T_{skok}}^{t=T_{koniec}} (y_m(t) - y_o(t))^2, \quad (1)$$

gdzie:  $F(\mathbf{X})$  – funkcja skalarna,  $\mathbf{X} = \{p_1, p_2, \dots, p_K\}$  – wektor parametrów estymowanych,  $y_m(t)$ ,  $y_o(t)$  – odpowiedzi modelu (indeks m) i obiektu (indeks o) w chwili  $t$ ,  $T_{skok}$  – chwila początkowa, od której obliczana jest funkcja  $F(\mathbf{X})$ ,  $T_{koniec}$  – chwila końcowa, do której obliczana jest funkcja  $F(\mathbf{X})$ ,

Proces estymacji parametrów  $\mathbf{X}$  modelu dla określonej funkcji  $F(\mathbf{X})$  polega na jej optymalizacji, a dokładniej minimalizacji. Proces ten można realizować z wykorzystaniem algorytmów poszukiwania optimum lokalnego lub globalnego. Pierwszą grupę stanowią algorytmy gradientowe. Algorytmy te charakteryzują się względnie dużą szybkością. Ich podstawowym ograniczeniem jest zależność uzyskanego rozwiązania od punktu startowego. Algorytmy te znajdują bowiem optimum lokalne. Do drugiej grupy algorytmów można zaliczyć algorytmy typu Monte Carlo oraz algorytmy genetyczne. Zaletą algorytmów tego typu jest zdolność przeszukiwania całej przestrzeni rozpiętej na wektorze estymowanych parametrów. Ich wadą jest niezdolność (a przynajmniej bardzo ograniczona zdolność) do precyzyjnego wskazania lokalizacji ekstremum funkcji  $F(\mathbf{X})$ .

Do zaprezentowanej w niniejszym referacie estymacji parametrów generatora synchronicznego, wykorzystano algorytm gradientowy z korekcją współczynnika zbieżności. W tym przypadku wybór metody optymalizacji podyktowany jest

dobłą zbieżnością uzyskiwanych wyników, przy stosunkowo krótkim czasie trwania procesu estymacji.

Estymacja parametrów modelu może być realizowana w dwojaki sposób. Może być ona realizowana przez jednoczesną estymację kilku parametrów lub estymację jednego parametru. Drugie podejście jest realizowane, gdy dysponujemy pewną informacją o wartościach niektórych (pozostających) parametrów oraz w przypadku, gdy niektóre parametry są względnie dobrze zidentyfikowane, natomiast dany (poszukiwany) parametr ma decydujący wpływ na analizowaną odpowiedź.

Zdolność algorytmu do prawidłowej estymacji parametrów zależy od liczby parametrów estymowanych, parametrów definiujących proces estymacji oraz od rodzaju testu, z jakiego odpowiedź jest wykorzystywana w procesie identyfikacji dynamiki.

Przedstawiona w referacie identyfikacja parametrów generatora wymaga przeprowadzenia dwóch testów na bloku wytwórczym. Obydwa testy związane są z wyłączeniem generatora z pracy równoległej z systemem i różnią się między sobą obciążeniem generatora przed wyłączeniem:

- *Test 1* – moc czynna generatora powinna być bliska zeru, a moc bierna (pobierana lub oddawana) na poziomie 10-30% mocy znamionowej pozornej generatora.
- *Test 2* – moc czynna generatora powinna być na poziomie 10-30% mocy znamionowej pozornej generatora, a moc bierna powinna być bliska zeru.

Ponadto, w zależności od przeprowadzonego testu estymowane są odpowiednie parametry generatora:

- *Test 1* – estymacja parametrów w osi d:  $X_d$ ,  $X'_d$ ,  $X''_d$ ,  $T_{d0}$ ,  $T'_{d0}$ .
- *Test 2* – estymacja stałej inercji  $H$  oraz parametrów w osi q:  $X_q$ ,  $X'_q$ ,  $X''_q$ ,  $T_{q0}$ ,  $T'_{q0}$ .

Estymację parametrów należy przeprowadzić w trzech krokach, gdzie kolejność wykonywanych kroków jest istotna ze względu na poprawność otrzymywanych wyników.

### Krok 1

W *Kroku 1* należy przyjąć wartości parametrów modelu, które są możliwe do uzyskania od producenta jednostki wytwórczej. Do tych parametrów należą m.in.: moc znamionowa  $S_{gn}$ , napięcie znamionowe  $U_{gn}$ , współczynnik mocy  $\cos\varphi_n$ , rezystancja stojana  $R_{str}$  oraz reaktancja rozproszenia stojana  $X_l$ . Przy braku informacji od producenta, dla typowych jednostek można przyjąć wartości parametrów dostępne w literaturze.

### Krok 2

W *Kroku 2* przeprowadzana jest estymacja parametrów modelu generatora w osi d. Teoretycznie wszystkie poszukiwane parametry powinny być estymowane jednocześnie, wykorzystując w tym celu przebiegi uzyskane ze zrzutu mocy biernej *Test 1*. Do porównania wyników powinien zostać tutaj wykorzystany przebieg napięcia na zaciskach generatora, zarejestrowany jako odpowiedź na wyłączenie generatora. Proponowana gradientowa metoda estymacji ma trudności z wyznaczeniem reaktancji podprześciowej  $X''_d$  oraz stałej czasowej podprześciowej  $T'_{d0}$ . Zatem, w pierwszej kolejności, przed rozpoczęciem procesu estymacji, należy wyznaczyć reaktancję podprześciową z następujących zależności:

$$X''_d = \frac{\Delta U''}{I}, \quad (2)$$

$$I = \frac{\sqrt{\left(\frac{P_g}{S_{gn}}\right)^2 + \left(\frac{Q_g}{S_{gn}}\right)^2}}{U_g}, \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta U''$  – skokowa zmiana napięcia po wyłączeniu gen.;  $P_g$  – moc czynna generatora przed wyłączeniem gen. (powinna być bliska zeru);  $Q_g$  – moc bierna przed wyłączeniem gen.;  $U_g$  – napięcie na zaciskach generatora przed wyłączeniem gen.;  $S_{gn}$  – moc znamionowa pozorna generatora.

W przypadku stałej czasowej podprześciowej  $T'_{d0}$ , wartość należy uzyskać od producenta. Jeżeli jest to niemożliwe, to można przyjąć wartości typowe (z zakresu 0,05 s ÷ 0,10 s).

### Krok 3

W *Kroku 3* estymowane są parametry w osi q:  $X_q$ ,  $X'_q$ ,  $X''_q$ ,  $T_{q0}$ ,  $T'_{q0}$  oraz stała inercji  $H$ . *Krok 3* może zostać wykonany tylko pod warunkiem przeprowadzenia dopasowania parametrów w osi d zgodnie z *Krokiem 2*.

Podobnie jak w *Kroku 2* tu również wszystkie parametry powinny być estymowane jednocześnie. W praktyce, korzystając z *Testu 2* nie ma możliwości prawidłowego określenia stałej czasowej  $T'_{q0}$  oraz reaktancji  $X''_q$ . W takim przypadku wartości tych parametrów można przyjąć jak dla osi d, czyli  $T'_{q0} = T'_{d0}$  oraz  $X''_q = X''_d$ . Takie podejście nie będzie miało w konsekwencji dużego wpływu na elektromechaniczne mody modelowanego systemu.

W przypadku stałej inercji  $H$ , może ona zostać wyznaczona niezależnie. W tym celu należy wykorzystać przebieg prędkości generatora zarejestrowany podczas wykonywania *Testu 2* oraz skorzystać z następującej zależności:

$$H = \frac{P_g}{2S_{gn}} \left( \frac{\omega_n}{\frac{d\omega}{dt}} \right), \quad (4)$$

gdzie:  $P_g$  – moc czynna generatora przed wyłączeniem gen.;  $\omega_n$  – prędkość znamionowa;  $d\omega/dt$  – przyspieszenie wirnika w chwili  $t_{0+}$ , tzn. bezpośrednio po wyłączeniu generatora.

## 3. PRZYKŁADOWE WYNIKI ESTYMACJI WYBRANYCH PARAMETRÓW MODELU DYNAMICZNEGO GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Poniżej zamieszczono przykładowe wyniki estymacji uzyskane dla przykładowego hydrogeneratora. Analizy przeprowadzono w łączonym środowisku obliczeniowym, które składa się z autorskiego programu nadrzędnego, w którym jako silnik obliczeniowy wykorzystano program Power Factory firmy DIGSilent. Postać modelu generatora oraz jego parametrów są tu zatem zdefiniowane (narzucone) przez program Power Factory.

### 3.1. Estymacja parametrów dla hydrogeneratora

W analizach dotyczących hydrogeneratora wykorzystano jednostkę o mocy 150 MVA. Zgodnie z opisem zamieszczonym powyżej estymację parametrów przeprowadzono w trzech krokach.

### Krok 1

W tablicy 1 zamieszczono dane uzyskane od producenta, które nie podlegają estymacji.

Tablica 1. Parametry modelu przyjęte w Kroku 1

Parametr	Jednostka	Wartość
$S_{gn}$	MVA	150
$U_{gn}$	kV	13,8
$\cos\phi_n$	–	0,85
$R_{str}$	p.u.	0,0013
SG10	–	0,36
SG12	–	0,78
$X_l$	p.u.	0,0785
$D$	–	0

### Krok 2

W tym kroku, estymacji podlegały trzy parametry:  $X_d$ ,  $X'_d$ ,  $T'_{d0}$ . Reaktancja  $X'_d$  została wcześniej wyznaczona zgodnie z (3), (4) i przyjęta jako nieestymowana. Wartość stałej czasowej  $T'_{d0}$  przyjęto równą 0,1 s (podczas gdy wartość rzeczywista wynosiła 0,055 s). W procesie estymacji wykorzystano uzyskane ze zrzutu mocy biernej (Test 1). Z założeń algorytmu gradientowego wynika, że dla każdego

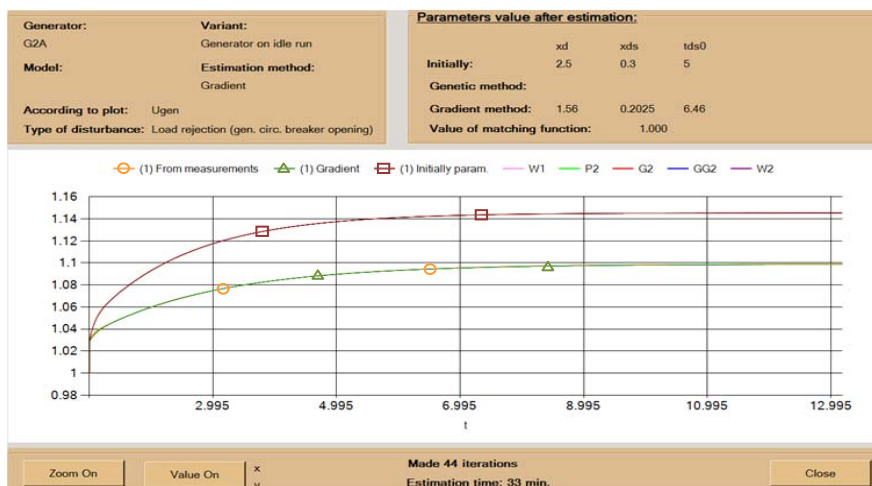
estymowanego parametru powinien zostać określony zakres granicznych wartości (min i max), które podczas estymacji nie mogą być przekroczone.

W tablicy 2 zamieszczono przyjęte wartości dla tych ograniczeń. W tablicy tej przedstawiono również wartości początkowe i rzeczywiste estymowanych parametrów. W niniejszym referacie wartości rzeczywiste oznaczają wartość parametrów modelu generatora dla jakich uzyskano odpowiedzi generatora na zrzut mocy czynnej i mocy biernej wykorzystywane w procesie estymacji.

Tablica 2. Wartości rzeczywiste, początkowe oraz ograniczenia estymowanych parametrów w osi d

Parametr	Wartość rzeczywista	Wartość min	Wartość początkowa	Wartość max
$X_d$	1,57	1,25	2,5	3,75
$X'_d$	0,2	0,16	0,3	0,5
$T'_{d0}$	6,63	2,5	5	7,5

Jako startowy punkt pracy generatora (przed wyłączeniem) przyjęto:  $P_g = 2$  MW,  $Q_g = 30$  Mvar (ind.)  $U_g = 1$  j.w. W procesie estymacji parametrów wykorzystano przebieg napięcia na zaciskach generatora.



Rys. 1. Wyniki estymacji parametrów w osi d (Krok 2)

Rezultat estymacji parametrów z wykorzystaniem metody gradientowej przedstawiono na rysunku 1. Przebieg oznaczony kolorem brązowym odpowiada napięciu generatora uzyskanemu dla wartości początkowych estymowanych parametrów. Kolorem zielonym oznaczono napięcie generatora dla parametrów uzyskanych w procesie estymacji, a kolorem pomarańczowym przedstawiono przebieg dla rzeczywistych wartości parametrów. Z wykresu wynika, że przebiegi napięcia uzyskane dla wartości rzeczywistych i dla wartości po estymacji są do siebie bardzo zbliżone. Również wartości parametrów uzyskanych w procesie estymacji są bardzo zbliżone do wartości rzeczywistych:  $X_d = 1,56$  (wartość rzeczywista: 1,57),  $X'_d = 0,2025$  (wartość rzeczywista: 0,2),  $T'_{d0} = 6,46$  s (wartość rzeczywista: 6,63 s).

### Krok 3

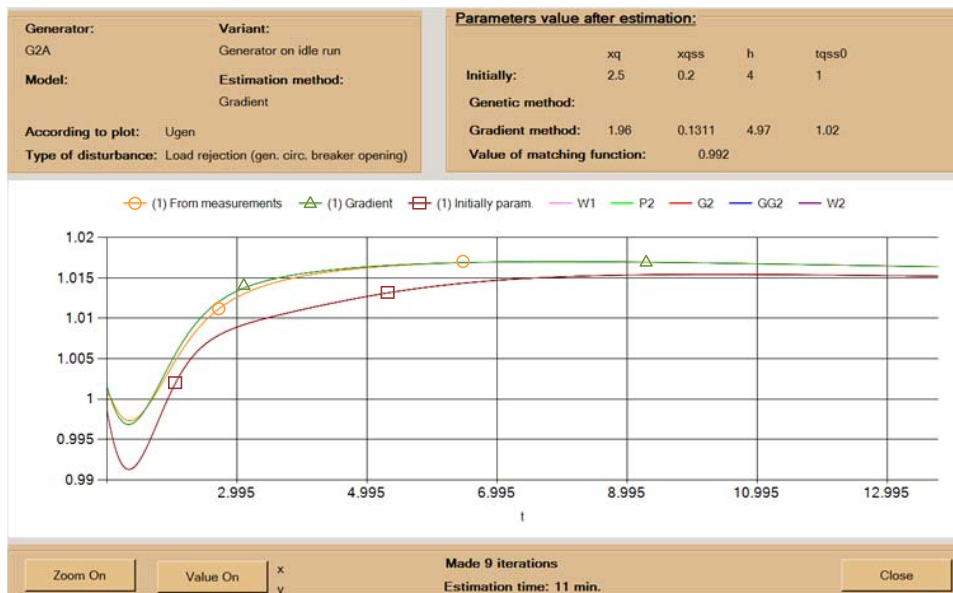
W Kroku 3 przeprowadzono estymację pozostałych parametrów. Wykorzystano w tym przypadku odpowiedź generatora po wyłączeniu generatora z pracy równoległej, przy obciążeniu generatora mocą czynną (Test 2). W tablicy 3 zamieszczono wartości rzeczywiste, początkowe oraz przyjęty do-

puszczalny zakres estymowanych parametrów. Zachowano przy tym zależność, która powinna być spełniona:  $X_q > X'_q > X_l$ . Należy tu zauważyć, że w modelu hydrogeneratora reaktancja przejściowa  $X'_q$  oraz stała czasowa przejściowa  $T'_{q0}$  (lub  $T'_q$ ) nie są wykorzystywane.

Tablica 3. Wartości rzeczywiste, początkowe oraz ograniczenia estymowanych parametrów w osi q

Parametr	Wartość rzeczywista	Wartość min	Wartość początkowa	Wartość max
$X_q$	2	1,25	2,5	3,75
$X'_q$	0,157	0,1	0,2	0,3
$H$	5,23	2	4	6
$T'_{q0}$	1,2	0,5	1	1,5

Przyjęto w tym przypadku do analizy punkt pracy generatora (przed wyłączeniem), to  $P_g = 20$  MW oraz  $Q_g = 0$  Mvar. W analizie wykorzystano przebieg napięcia na zaciskach generatora.



Rys. 2. Wyniki estymacji parametrów w osi q (Krok 3)

Podobnie jak na poprzednim rysunku, tu również (rys. 2) przebieg oznaczony kolorem brązowym jest przebiegiem napięcia, który został uzyskany w wyniku symulacji z początkowymi wartościami parametrów estymowanych. Kolor zielony oznacza przebieg napięcia z parametrami uzyskanymi w efekcie estymacji, a kolor pomarańczowy z parametrami rzeczywistymi. W tym przypadku w efekcie estymacji uzyskuje się stosunkowo dużą zbieżność zarówno w odniesieniu do przebiegów jak i w odniesieniu do poszukiwanych wartości parametrów:  $X_q = 1,96$  (wartość rzeczywista: 2),  $X'_q = 0,2$  (wartość rzeczywista: 0,157),  $H = 4,97$  s (wartość rzeczywista: 5,23 s),  $T'_{q0} = 1,02$  s (wartość rzeczywista: 1,2 s).

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Prawidłowe odwzorowanie rzeczywistej pracy systemu elektroenergetycznego jest silnie powiązane z właściwym określeniem parametrów uwzględnionych modeli tego systemu. Powyższe rozważania pokazują, że wykorzystując przebiegi zarejestrowane podczas wyłączenia generatora z pracy równoległej oraz metodę optymalizacyjną gradientową możliwe jest prawidłowe określenie

wybranych parametrów modelu dynamicznego generatora synchronicznego.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Kundur P., "Power system stability and control" McGraw-Hill, 1994.
2. IEEE Guide for Synchronous Generator Modelling Practices and Applications in Power System Stability Analyses, IEEE Std 1110-2002 (Revision of IEEE Std 1110-1991), 2003.
3. IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines, IEEE Std 115-1995, 1995.
4. IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines Part I-- Acceptance and Performance Testing Part II--Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis, IEEE Std 115-2009 (Revision of IEEE Std 115-1995), 2010.
5. Paszek S., Boboń A., Kudła J., Białek J., Abi-Samra N.: Parameter Estimation of the Mathematical Model of a Generator, Excitation System and Turbine. Przegląd Elektrotechniczny, No.11, 2005.

### ESTIMATION OF SELECTED SYNCHRONOUS GENERATOR PARAMETERS BASED ON GRADIENT METHOD – CONFERENCE PAPER

**Key-words:** synchronous generator model, estimation, gradient method

The authors presents a method for the estimation of synchronous generator model parameters using a gradient algorithm. The paper shows an example of model parameter estimation for a turbogenerator and hydrogenerator, based on the generator voltage time responses obtained during active and reactive power rejection test.