

KOZYRA Jacek¹

STRATY MOCY CZYNNEJ W LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ Z PRZYŁĄCZONYMI URZĄDZENIAMI FACTS

W publikacji przedstawiono modele linii elektroenergetycznej z przyłączonymi urządzeniami FACTS dla których określono zależności strat moc wynikających z przyłączenia układów CSC, SSSC i UPFC. Uzyskane zależności strat mocy czynnych wykorzystano do określenia różnic między stratami mocy, które wynikają ze sposobów odwzorowań linii elektroenergetycznych oraz przyłączenia urządzeń FACTS. Różnice strat mocy w linii elektroenergetycznej wyznacza się między stratą mocy czynnej linii oznaczonej jako ΔP_{FACTS} z przyłączonym urządzeniem FACTS a stratą mocy czynnej dla przyjętego odwzorowania linii, czyli ΔP_{linii}

THE LOSS OF ACTIVE POWER IN AN ELECTRICAL LINE WITH ATTACHED FACTS DEVICES

This publication presents models of an electrical line with attached FACTS devices, for which the dependencies of power loss resulting from the attachment of CSC, SSSC and UPFC were established. The obtained dependencies of active power losses were used to determine the differences between the power losses resulting from the methods of projecting electrical lines and from the attachment of FACTS devices.

The differences in power loss in an electrical line is determined between the active power loss marked as ΔP_{FACTS} with attached FACTS devices and active power loss for the adopted lines projection, or ΔP_{linii}

1. WSTĘP

Nowe, oferowane urządzenia, wykorzystujące tyrystory wielkiej mocy są drogie. Duży wpływ na cenę mają koszty związane z badaniami, wykonaniem i testowaniem prototypów układów tyrystorowego sterowania. Wysokie koszty powodują konieczność wykonania dokładnych analiz techniczno – ekonomicznych, które powinny dać odpowiedź na pytania, jakich korzyści można oczekiwać od nowych urządzeń. Dla potencjalnych zastosowań urządzeń FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) w układach przesyłowych należy wziąć pod uwagę wartości pełnego modelu linii elektroenergetycznej oraz warunki jej pracy.

¹Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; ul. Malczewskiego 29. Tel: + 48 48 361-77-57,
E-mail: j.kozyra@pr.radom.pl

W celu przedstawienia przepływu mocy czynnych w układach elektroenergetycznych przyjmuje się z reguły uproszczony model linii odwzorowany reaktancją X . W linii elektroenergetycznej odwzorowanej reaktancją X występują jedynie straty mocy biernej [38]. Prowadzi to do przedstawienia przesyłanej mocy czynnej linią elektroenergetyczną prądu przemiennego zależnością:

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (1)$$

gdzie:

U_1, U_2 – napięcie na początku i końcu układu przesyłowego,

X – reaktancja indukcyjna linii przesyłowej,

δ – kąt rozchylenia między wektorami napięć \underline{U}_1 i \underline{U}_2 .

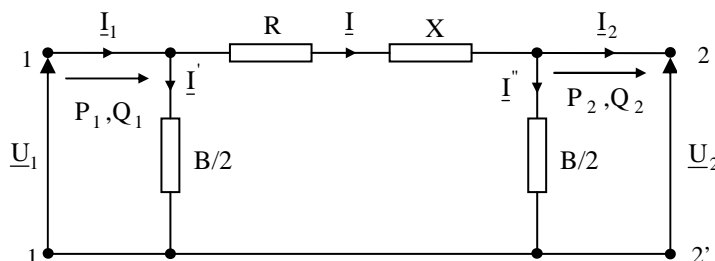
W wielu publikacjach dotyczących sterowania pracą sytemu elektroenergetycznego określono zależności mocy czynnych i biernych dla uproszczonego schematu linii elektroenergetycznej odwzorowanej reaktancją X z przyłączonymi urządzeniami FACTS. Podane wzory pomijają wpływ pozostałych parametrów, które również charakteryzują możliwości przesyłowe linii.

Celem pracy jest określenie wpływu dokładniejszego modelowania na określenie strat mocy czynnej w linii elektroenergetycznej z przyłączonymi urządzeniami FACTS typu CSC, SSSC i UPFC.

2. MODEL LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ

2.1 Równania podstawowe

Układ przesyłowy można przedstawić za pomocą linii elektroenergetycznej odwzorowanej parametrami określającymi własności fizyczne linii. Są to parametry podłużne: rezystancja R i reaktancja X oraz parametry poprzeczne: konduktancja G i susceptancja B . W celu otrzymania zależności strat mocy czynnych i biernych rozpatruje się linię elektroenergetyczną nazwaną modelem typu RXB (rys.1), który uwzględnia rezystancję, reaktancję i susceptancję. Ze względu na niewielką wartość, a tym samym znikomy wpływ na przesył mocy w modelu linii pominięto konduktancję.



Rys.1. Model linii elektroenergetycznej typu RXB

Opis symboli występujących na modelu linii:

$\underline{U}_1, \underline{U}_2$ - wektory napięć na końcach linii w punktach 1 i 2,

P_1 - moc czynna wypływając z punktu 1,
 P_2 - moc czynna dopływająca do punktu 2,
 Q_1 - moc bierna wypływająca z punktu 1,
 Q_2 - moc bierna dopływająca do punktu 2,
 \underline{I}_1 - prąd w postaci zespolonej wypływający z punktu 1,
 \underline{I}_2 - prąd w postaci zespolonej dopływający do punktu 2,
 \underline{I} - prąd w postaci zespolonej płynący przez parametry podłużne,
 $\underline{I}'_1, \underline{I}'_2$ - prądy w postaci zespolonej płynące przez parametry poprzeczne,

Różnica między mocą wypływającą z węzła 1, a mocą dopływającą do węzła 2, określa stratę mocy w linii elektroenergetycznej. Oznacza to, że dla poszczególnych odwzorowań linii parametrami podłużnymi i poprzecznymi stratę mocy określa zależność:

$$\underline{\Delta S} = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 \quad (2)$$

Moce \underline{S}_1 i \underline{S}_2 są określone zależnościami [1,2]:

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = P_1 + jQ_1 \quad (3)$$

$$\underline{S}_2 = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* = P_2 + jQ_2 \quad (4)$$

Po uwzględnieniu we wzorze (2) zależności (3) i (4) otrzymuje się:

$$\underline{\Delta S} = P_1 - P_2 + j(Q_1 - Q_2) = \Delta P + j\Delta Q \quad (5)$$

gdzie : ΔP - oznacza stratę mocy czynnej w liniach elektroenergetycznych

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (6)$$

ΔQ - oznacza stratę mocy biernej w liniach elektroenergetycznych

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 \quad (7)$$

2.2 Straty mocy czynnej w przyjętym modelu linii elektroenergetycznej

Dla modelu linii RXB uwzględniając we wzorze (6) zależności:

$$P_1 = \frac{X}{R^2 + X^2} U_1 U_2 \sin\delta + \frac{R}{R^2 + X^2} (U_1^2 - U_1 U_2 \cos\delta) \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{X}{R^2 + X^2} U_1 U_2 \sin\delta + \frac{R}{R^2 + X^2} (U_1 U_2 \cos\delta - U_2^2) \quad (9)$$

Otrzymano:

$$\Delta P_{RXB} = \frac{R}{R^2 + X^2} (U_1^2 - 2U_1U_2\cos\delta + U_2^2) \quad (10)$$

Z powyższego wzoru wynika, że na wartość straty mocy czynnej wpływa reaktancja X oraz rezystancja R . Strata mocy czynnej określona, zależnością (10), spełnia następującą nierówność:

$$\begin{aligned} \Delta P_{RXB} &= \frac{R}{R^2 + X^2} (U_1^2 - 2U_1U_2\cos\delta + U_2^2) = \frac{R}{R^2 + X^2} (U_1 - U_2)^2 + \frac{2R}{R^2 + X^2} U_1U_2(1 - \cos\delta) > \\ &> \frac{R}{R^2 + X^2} (U_1 - U_2)^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Z nierówności wynika, że dla modelu linii RXB strata mocy czynnej linii elektroenergetycznej jest większa od zera. Przyjmując model linii odwzorowany parametrami XB oraz X zależność (10) wynosi:

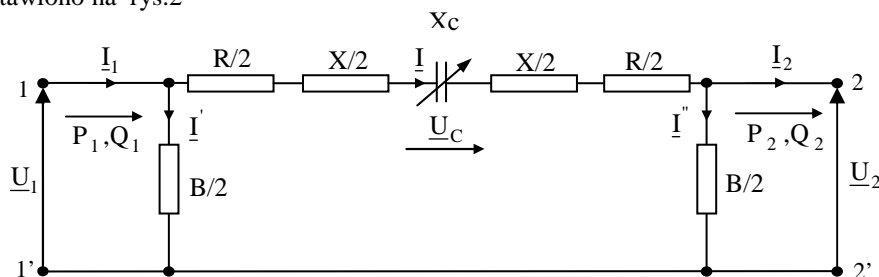
$$\Delta P_{XB} = \Delta P_X = 0 \quad (12)$$

W zależności (10), straty mocy czynnej ΔP zależą głównie od rezystancji linii i zależnie od odwzorowania mogą przyjmować wartości dodatnie lub być równa zero. Dla dalszej analizy strat mocy czynnej przyjmuje się model linii RXB, z przyłączonymi szeregowymi urządzeniami FACTS typ CSC i SSSC.

3. MODEL LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ Z PRZYŁĄCZONYM UKŁADEM SZEREGOWEJ KOMPENSACJI

3.1 Statyczny szeregowy kompensator CSC

Układ szeregowo sterowanej kompensacji CSC (*Controlled Series Compensation*) wykorzystuje szeregowe połączenie kondensatorów z linią przesyłową, które kompensują reaktancję wypadkową linii. Zadaniem szeregowej kompensacji jest zmniejszanie reaktancji układu przesyłowego, a tym samym umożliwienie regulacji przepływu mocy czynnej i biernej. Model linii elektroenergetycznej RXB z przyłączonym układem CSC przedstawiono na rys.2



Rys.2 Model linii elektroenergetycznej RXB z przyłączonym układem CSC

Dla modelu linii RXB z przyłączonym układem CSC uwzględniając we wzorze (6) zależności:

$$P_1 = \frac{X - X_C}{R^2 + (X - X_C)^2} U_1 U_2 \sin \delta + \frac{R}{R^2 + (X - X_C)^2} (U_1^2 - U_1 U_2 \cos \delta) \quad (13)$$

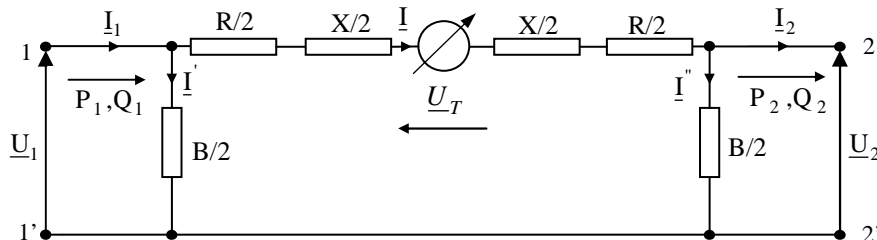
$$P_2 = \frac{X - X_C}{R^2 + (X - X_C)^2} U_1 U_2 \sin \delta + \frac{R}{R^2 + (X - X_C)^2} (U_1 U_2 \cos \delta - U_2^2) \quad (14)$$

Otrzymano:

$$\Delta P_{RXB} = \frac{R}{R^2 + (X - X_C)^2} (U_1^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta + U_2^2) \quad (15)$$

3.2 Statyczny synchroniczny kompensator szeregowy SSSC

Układ statycznego synchronicznego szeregowego kompensatora (*Static Synchronous Series Compensator* – **SSSC**, wykorzystuje źródło napięciowe VSC (*Voltage Source Converter*) o regulowanej amplitudzie i fazie prostopadłej do prądu linii przesyłowej. Podłączony jest do linii przesyłowej przez transformator dodawczy szeregowy. Dzięki temu do sieci wprowadzane jest napięcie, które może być w fazie lub przeciw fazie z napięciem układu przesyłowego. Wprowadzane napięcie ma charakter straty napięcia na reaktancji indukcyjnej i pojemnościowej. Napięcie dodawcze dobiera się tak, aby kompensować stratę napięcia na indukcyjności linii przy określonym prądzie. Model linii elektroenergetycznej RXB z przyłączonym układem SSSC przedstawiono na rys.3



Rys.3 Model linii elektroenergetycznej RXB z przyłączonym układem SSSC

Dla modelu linii RXB z przyłączonym układem SSSC uwzględniając we wzorze (6) zależności:

$$P_1 = \left[\frac{X}{R^2 + X^2} U_1 U_2 \sin \delta + \frac{R}{R^2 + X^2} (U_1^2 - U_1 U_2 \cos \delta) \right] \cdot \left(1 - \frac{U_T}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta}} \right) \quad (16)$$

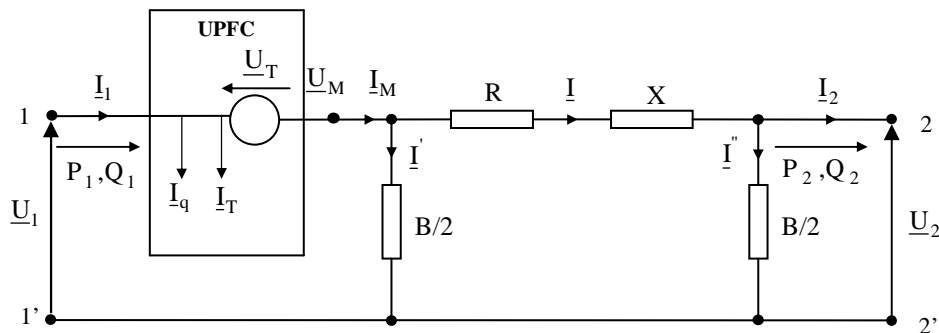
$$P_2 = \left[\frac{X}{R^2 + X^2} U_1 U_2 \sin \delta + \frac{R}{R^2 + X^2} (U_1 U_2 \cos \delta - U_2^2) \right] \cdot \left(1 - \frac{U_T}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta}} \right) \quad (17)$$

Otrzymano:

$$\Delta P_{RXB} = \left[\frac{R}{R^2 + X^2} (U_1^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta + U_2^2) \right] \cdot \left(1 - \frac{U_T}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta}} \right) \quad (18)$$

3.3 Zunifikowany sterownik przepływu mocy UPFC

Zunifikowany sterownik przepływu mocy (*Unified Power Flow Controller* – UPFC) jest układem, który skupia cechy szeregowych i równoległych układów FACTS. Spośród wielu urządzeń określanych mianem FACTS najbardziej wszechstronnym jest układ UPFC. Składa on się z dwóch konwerterów tyrystorowych GTO, połączonych linią prądu stałego i równoległym kondensatorem. Taka konstrukcja układu umożliwi regulację amplitudy i fazy napięcia \underline{U}_T i amplitudy napięcia \underline{U}_1 . Część bocznikowa składa się z transformatora, zasilającego oraz konwertera pełniącego funkcje prostownika, szeregowo to drugi konwerter pracujący jako falownik oraz transformator dodawczy. Część szeregowo odpowiada za regulację przepływu mocy czynnej i biernej w linii przesyłowej, część bocznikowa wpływa na moc bierną, regulując amplitudę napięcia \underline{U}_1 .



Rys.4 Model linii elektroenergetycznej RXB z przyłączonym układem UPFC

Dla modelu linii RXB z przyłączonym układem UPFC uwzględniając we wzorze (6) zależności:

$$P_1 = \frac{X}{R^2 + X^2} (U_1 U_2 \sin \delta + U_2 U_T \sin \varphi_T) + \frac{R}{R^2 + X^2} [U_1^2 - U_1 U_2 \cos \delta - U_2 U_T \cos \varphi_T + 2U_1 U_T \cos(\delta - \varphi_T) + U_T^2] \quad (19)$$

$$P_2 = \frac{X}{R^2 + X^2} (U_1 U_2 \sin \delta + U_2 U_T \sin \varphi_T) + \frac{R}{R^2 + X^2} (U_1 U_2 \cos \delta + U_2 U_T \cos \varphi_T - U_2^2) \quad (20)$$

Otrzymano:

$$\Delta P_{\text{RXB}} = \frac{R}{R^2 + X^2} \left[U_1^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta - 2U_2 U_T \cos \varphi_T + 2U_1 U_T \cos(\delta - \varphi_T) + U_T^2 + U_2^2 \right] \quad (21)$$

4. RÓŻNICE STRAT MOCY CZYNNEJ W PRZYJĘTYM MODELU LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ

Uzyskane w rozdziale 3 zależności strat mocy czynnych można wykorzystać do określenia różnic między stratami mocy, które wynikają ze sposobów odwzorowań linii elektroenergetycznych oraz przyłączenia urządzeń FACTS. Różnice strat mocy ΔP_r w linii elektroenergetycznej wyznacza się między stratą mocy czynnej linii z przyłączonym urządzeniem FACTS, oznaczonej jako ΔP_{FACTS} a stratą mocy czynnej i biernej dla przyjętego odwzorowania linii, czyli ΔP_{inii} . Można, zatem zapisać że różnica straty mocy czynnej wynosi:

$$\Delta P_r = \Delta P_{\text{FACTS}} - \Delta P_{\text{inii}} \quad (22)$$

4.1 Różnice strat mocy czynnej w linii z przyłączonymi urządzeniami FACTS

Dla układu **CSC**, uwzględniono we wzorze (22) zależności (10), (15) i otrzymano dla modelu RXB:

$$\Delta P_{\text{rRXB}} = \frac{RX_C(2X - X_C)}{(R^2 + X^2)[R^2 + (X - X_C)^2]} (U_1^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta + U_2^2) \quad (23)$$

Dla układu **SSSC**, uwzględniono we wzorze (22) zależności (10), (18) i otrzymano dla modelu RXB:

$$\Delta P_{\text{rRXB}} = \left[\frac{R}{R^2 + X^2} (U_1^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta + U_2^2) \right] \cdot \left(\frac{-U_T}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta}} \right) \quad (24)$$

Dla układu **UPFC**, uwzględniono we wzorze (22) zależności (10), (21) i otrzymano dla modelu RXB:

$$\Delta P_{\text{rRXB}} = \frac{R}{R^2 + X^2} \left[U_T^2 - 2U_2 U_T \cos \varphi_T + 2U_1 U_T \cos(\delta - \varphi_T) \right] \quad (25)$$

4.2 Graficzne przedstawienie różnic strat mocy czynnej

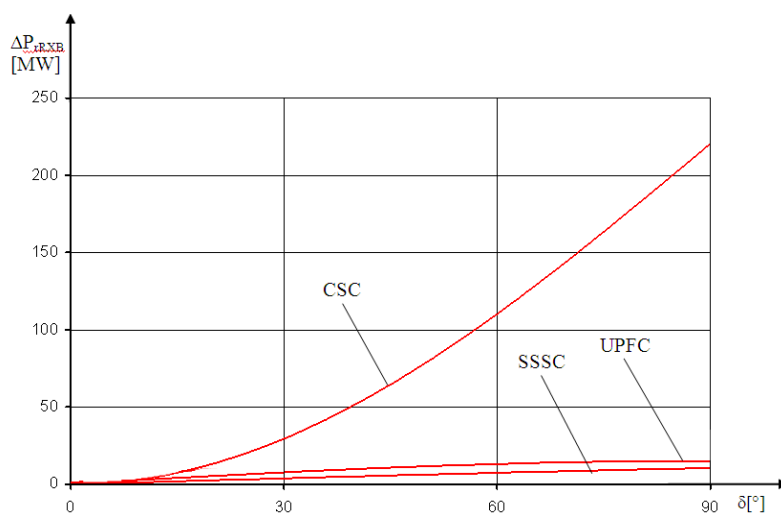
Dla otrzymanych zależności różnic strat mocy przedstawiono na rys. 5 przebiegi strat mocy czynnych w funkcji kąta δ . Graficzne ilustracje posłużą do porównania różnic strat mocy czynnych dla przyjętego modelu linii z przyłączonymi urządzeniami FACTS. Zakres różnicy straty mocy czynnej między linią przesyłową z przyłączonym urządzeniem FACTS a stratą mocy w linii bez urządzeń FACTS, zawiera się w obszarze między osią oznaczoną kątem δ a przebiegiem dla odpowiedniego urządzenia FACTS.

Do wyznaczenia charakterystyk przyjęto następujące parametry linii o długości 200 km, moduły napięć na końcach linii $U_1 = U_2 = 400$ [kV], reaktancja $X = 67$ [Ω], rezystancja $R = 5,6$ [Ω] i susceptancja $B = 686,6$ [μS]. Dla urządzeń FACTS przyjęto regulowane parametry: układ CSC $X_C = 13,4$ [Ω], układ SSSC $U_T = -15$ [kV], układ UPFC $U_T = 15$ [kV] dla $\varphi_T = 90^\circ$. W tabeli 1 zamieszczono wartości obliczonych różnic strat mocy czynnych. Uzyskane wyniki obliczeń otrzymano na podstawie zależności z roz. 3.

Tab. 1 Różnice strat mocy czynnych

δ	CSC	SSSC	UPFC
[°]	ΔP_{rRXB} [MW]		
0	0	0,1	0,3
5	0,8	0,6	1,6
10	3,3	1,6	2,9
20	13,3	2,6	5,4
30	29,5	3,8	7,7
40	51,6	5,1	9,8
45	64,6	5,7	10,8
50	78,8	6,3	11,7
60	110,3	7,4	13,1
70	145,1	8,5	14,2
80	182,3	9,5	14,9
90	220,6	10,5	15,1

Dla otrzymanych zależności różnic strat mocy przedstawiono na rys. 5 przebiegi strat mocy czynnych w funkcji kąta δ .



Rys.5 Różnice strat mocy czynnej ΔP_{rXB} w linii z przyłączonymi urządzeniami FACTS

5. WNIOSKI

Na podstawie charakterystyki oraz obliczeń, różnice strat mocy czynnych między poszczególnymi urządzeniami FACTS różnią się od siebie a także w odniesieniu do linii pracującej bez nich. Na charakterystyce rys.5 można zaobserwować, że wraz ze wzrostem kąta δ straty mocy czynnej zwiększają się i zależą od oddziaływania danego typu urządzenia FACTS na regulację przepływu mocy czynnej.

Istotną różnicę w poziomie strat mocy czynnej można zauważyć dla układów kompensacji szeregowej typu CSC i SSSC. Układ CSC prezentuje najwyższy poziom strat mocy czynnej spośród rozpatrywanych urządzeń FACTS. W całym przedziale kąta $\delta = 5^\circ \div 90^\circ$ obserwuje się dynamiczny wzrost strat mocy czynnej dla układu CSC przy proporcjonalnym przyroście straty dla układu SSSC. Można zatem wnioskować, że ekonomiczna praca tych układów pod względem powstawania strat powinna, odbywać się w zakresie małych kątów $\delta = 5^\circ \div 20^\circ$ dla układu CSC w przedziale realnych kątów $\delta = 5^\circ \div 45^\circ$ dla układu SSSC.

Układ UPFC wnosi do przesyłu mocy stały proporcjonalny do zmiany kąta δ poziom strat mocy. Dla mniejszych wartości φ_T straty przesyłowe układu UPFC zmniejszają się. W porównaniu z układem SSSC oba układy wykazują znaczne większe straty mocy czynnej. Dla kątów $\delta = 5^\circ \div 45^\circ$ straty wynoszą maksymalnie 5 MW dla układu SSSC i 10 MW dla układu UPFC.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kundur P.: *Power System Stability and Control*, New York, McGraw – Hill 1994,
- [2] Taylor C. W.: *Power System Voltage Stability*, New York, McGraw – Hill 1994.