

이산 전력시스템에서 TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 감도해석

(Sensitivity Analysis of Oscillation Modes Occurred by Periodic Switching Operations of TCSC in Discrete Power Systems)

김덕영*

(Deok-Young Kim)

요 약

본 논문에서는 RCF 해석법을 싸이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC를 포함하는 전력계통의 미소신호안정도 해석에 적용하였다. 이산시스템에서 RCF 해석법에 기초한 고유치 감도해석 알고리즘을 제시하고 TCSC를 포함하는 전력계통에 적용하였다. 사례연구를 통해서 RCF 해석법이 TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동모드의 변화와 새로이 발생하는 불안정 진동모드의 정확한 해석에 매우 유용한 해석방법임을 보였다. 또한 RCF 해석법에 기초한 고유치 감도해석 방법을 사용하여 이산시스템에서 주기적 스위칭 동작에 의해 발생하는 중요 진동모드에 대한 제어기 감도계수를 정확히 구할 수 있음을 보였다. 이러한 사례연구 결과는 기존의 연속시스템에서의 상태방정식에 의한 해석결과와 크게 다른 것이며, RCF 해석법이 TCSC와 같이 주기적 스위칭 동작을 하는 설비를 포함하는 이산전력계통의 해석에 매우 유용한 방법임을 보여준다.

Abstract

In this paper, the RCF(Resistive Companion Form) analysis method is applied to analyze small signal stability of power systems including thyristor controlled FACTS(Flexible AC Transmission System) equipments such as TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor). The eigenvalue sensitivity analysis algorithm in discrete systems based on the RCF analysis method is presented and applied to the power system including TCSC. As a result of simulation, the RCF analysis method is very useful to precisely calculate the variations of eigenvalues or newly generated unstable oscillation modes after periodic switching operations of TCSC. Also the eigenvalue sensitivity analysis method based on the RCF analysis method enabled to precisely calculate eigenvalue sensitivity coefficients of controller parameters about the dominant oscillation mode after periodic switching operations in discrete systems. These simulation results are different from those of the conventional continuous system analysis method such as the state space equation and showed that the RCF analysis method is very useful to analyze the discrete power systems including periodically operated switching equipments such as TCSC.

Key Words : Discrete Power System, Eigenvalue Sensitivity Analysis, Oscillation Mode, Periodic Switching Operation, RCF method, TCSC

* 주저자 : 군산대학교 전자정보공학부 교수

Tel : 063-469-4746, Fax : 063-469-4699, E-mail : dykim@kunsan.ac.kr

접수일자 : 2007년 12월 26일, 1차심사 : 2008년 1월 14일, 심사완료 : 2008년 2월 14일

1. 서론

전력계통에 사용되는 제어장치의 하나인 FACTS 설비는 기존의 계통설비를 그대로 유지하면서도 전송전력을 크게 증가시킬 수 있어서 계통설비의 경제성과 효율성을 극대화 할 수 있을 뿐만 아니라 계통의 안정도 향상에도 기여하는 등의 장점을 가지고 있다. 산업발달에 따른 전력수요의 증가를 만족시키기 위해서 전력계통의 규모 확대가 지속적으로 요구되는 반면에, 계통설비 증설의 문제는 현실적으로 사회적 및 환경적 문제에 기인하는 어려움을 겪고 있는 것을 고려할 때, 이들 FACTS 설비는 앞으로 보다 폭넓게 전력계통에 적용될 것으로 예상된다 [1-3]. 그러나 FACTS 설비는 이러한 긍정적인 요소와 함께 전력전자 소자의 스위칭 동작에 의한 왜란이나 새로운 진동모드의 발생 등과 같은 부정적인 효과도 같이 나타나는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 이러한 불연속 특성을 갖는 계통의 미소신호 안정도해석을 위해서 기존의 해석방법과 접근방법을 달리하여, 불연속 스위칭 동작을 하는 설비를 포함하는 전력계통을 이산시스템으로 모델링하고 수학적으로 강인한 특성을 갖는 RCF 해석법을 사용하여 이산 전력계통에 대해 상태전이방정식을 구성하고 이로부터 고유치 해석을 하여 스위칭 소자의 주기적 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동현상의 정확한 해석 결과를 구하는 방법을 사용하였다[4-5]. 또한 RCF 해석법에 기초한 감도해석을 통해서 불안정 진동모드에 가장 큰 영향을 미치는 제어기 정수의 선정과 진동현상의 원인분석이 가능하도록 하였으며, 직렬형 사이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC와 같이 불연속 스위칭 동작을 하는 설비를 포함하는 이산 전력계통의 안정도 향상에 사용할 수 있도록 하였다.

2. RCF 해석법에 의한 진동모드 해석

2.1 TCSC를 포함하는 이산계통의 진동모드 해석

TCSC를 포함하는 일기무한모선 계통도는 다음과 같다.

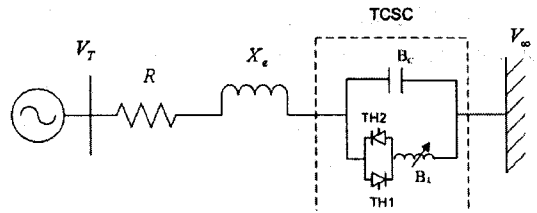


그림 1. TCSC가 설치된 일기무한모선 계통의 계통도
Fig. 1. One machine infinite bus system with TCSC

그림 1의 TCSC를 포함하는 계통에서 RCF 해석법을 사용하여 TCSC의 주기적인 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화를 해석한 결과 중에서 점화각이 144[°]인 경우의 해석결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 점화각 144[°]인 경우의 진동모드 해석
Table 1. Oscillation modes with 144[°] firing angle

	OFF	ON		OFF	
	8 step	9 step	10 step	11 step	12 step
고유치	-9.8029+;377.1154	-10.8419+;377.0159	-11.6717+;376.9312	-11.5025+;376.9489	-11.3600+;376.9635
	-2.9827+;6.3861	-1.7432+;7.1304	-1.2424+;7.8304	-1.3206+;7.6941	-1.3947+;7.5774
	0.8561	0.1438	-0.0593	-0.0294	0.0000
	-36.7997	-36.5966	-36.6745	-36.6527	-36.6348
	-2.7337	-41.1843	-43.0926	-42.7062	-42.3822
	-38.5368	-4.8570	-5.9166	-5.7367	-5.5732
	불안정	불안정	안정	안정	불안정
고유치	OFF				
	13 Step	14 Step	15 Step	16 Step	17 Step
	-11.2402+;376.9758	-11.1382+;376.9862	-11.0496+;376.9952	-10.9709+;377.0030	-10.9028+;377.0099
	-1.4638+;7.4766	-1.5265+;7.3893	-1.5865+;7.3120	-1.6423+;7.2442	-1.6947+;7.1849
	0.0248	0.0500	0.0755	0.0977	0.1235
	-36.6240	-36.6149	-36.6073	-36.6024	-36.5984
-42.1083	-41.8719	-41.6672	-41.4866	-41.3274	
-5.4246	-5.2914	-5.1688	-5.0564	-4.9526	
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	OFF	ON			
	18 Step	19 Step	20 Step		
	-10.8414+;377.0160	-11.2777+;376.9719	-11.6710+;376.9312		
	-1.7428+;7.1304	-1.4408+;7.5307	-1.2417+;7.8304		
	0.1408	0.0170	-0.0593		
	-36.5949	-36.6275	-36.6745		
-41.1847	-42.1959	-43.0915			
-4.8572	-5.4732	-5.9156			
	불안정	불안정	안정		

이산 전력시스템에서 TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 감도해석

표 1에서 TCSC가 동작하기 이전인 OFF시 불안정 하였던 계통이 TCSC 싸이리스터가 주기적 동작을 시작하여 ON이 되는 9번째 구간에서 10번째 구간까지에서 불안정 영역에서 안정영역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 표 1의 안정도 해석결과는 TCSC가 주기적으로 OFF/ON을 반복함에 따라서 불안정과 안정을 반복하는 형태를 보이지만, 이러한 진동모드의 해석결과 값은 연속시스템에서의 해석결과와는 매우 다른 결과값을 갖는 것을 알 수 있다.

표 1의 RCF 해석법을 사용한 진동모드 해석결과 중에서 점화각에 따라서 안정과 불안정의 다른 형태를 보이는 실수값을 갖는 진동모드 3에 대해서 TCSC 싸이리스터의 점화각이 126°, 144° 그리고 162°인 경우의 시간구간에서의 진동모드 궤적을 그림 2, 3, 그리고 4에 나타내었다.

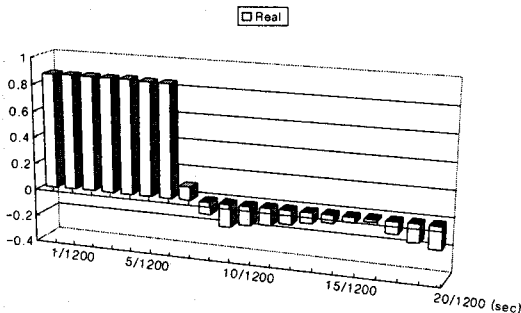


그림 2. 점화각 126(°)인 경우의 진동모드3의 궤적
Fig. 2. Locus of oscillation mode 3 with 126(°) firing angle

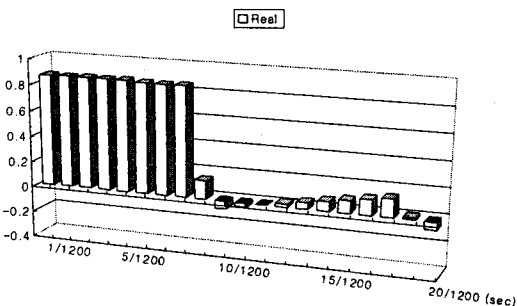


그림 3. 점화각 144(°)인 경우의 진동모드 3의 궤적
Fig. 3. Locus of oscillation mode 3 with 144(°) firing angle

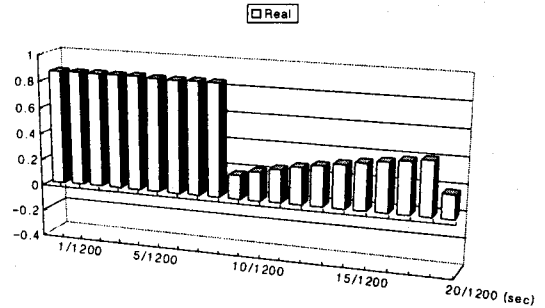


그림 4. 점화각 162(°)인 경우의 진동모드 3의 궤적
Fig. 4. Locus of oscillation mode 3 with 162(°) firing angle

그림 2는 점화각이 126°인 경우에 진동모드 3이 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 안정 영역에서 주기적으로 변화하는 것을 나타내며, 그림 3은 점화각이 144°인 경우 진동모드 3이 안정과 불안정 영역에서 주기적으로 변화하고 있는 것을 보여준다. 그림 4는 점화각이 162°인 경우로써 진동모드 3이 불안정 영역에서 주기적으로 변화하는 것을 보여준다.

그림 2와 그림 3, 그리고 그림 4에 나타낸 진동모드 3의 시간구간에서의 고유치 궤적은 싸이리스터의 점화각이 증가함에 따라서 진동모드가 안정영역에서 점차 불안정 영역으로 바뀌어가는 것을 나타낸 것으로, 각 진동모드 별로 주기적 스위칭 동작의 시간구간에서 정확한 해석결과를 구할 수 있는 RCF 해석법의 장점을 잘 나타내주는 결과이다.

3. RCF 해석법에 기초한 이산시스템의 감도해석

3.1 연속시스템에서의 감도해석법

연속시스템에서 일차 미분방정식으로 나타낸 전력계통의 일반형은 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BU \tag{1}$$

식 (1)에서 제어기 정수 u 의 변화에 대한 고유치 λ_i 의 변화비율을 나타낸 고유치 일차 감도계수는

이산 전력시스템에서 TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 감도분석

안정도를 향상시키기 위한 제어기 정수의 변화방향이 서로 반대로 나타난 해석결과를 보여준다.

4.2 이산시스템에서의 감도분석

그림 1의 TCSC를 포함하는 이산시스템에서 RCF 해석법에 기초한 감도분석의 결과는 싸이리스터가 ON 또는 OFF인 경우는 표 2의 해석결과와 정확히 일치한다.

TCSC 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 계통이 안정과 불안정을 반복하는 경우인 싸이리스터 점화각 144[°]인 경우에 대해 RCF 해석법을 사용한 해석결과 중에서 전기기계적 진동모드에 대한 감도분석 결과를 시간구간에 대해 표 3에 나타내었다.

표 3의 감도분석 결과는 TCSC 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 진동모드가 안정과 불안정을 반복하며 표 1에서와 같이 주기적으로 변화하는 경우, TCSC 제어기 정수에 대한 감도계수가 표 1의 새로운 형태의 진동모드에 대해서 표 2의 연속시스템에서의 해석결과와 달리 시간구간에서 주기적으로 변화하는 것을 보여준다.

표 3. 점화각 144(°)인 경우의 TCSC의 감도분석 ($\times 10^{-3}$)

Table 3. Sensitivity analysis of TCSC with 144(°) firing angle ($\times 10^{-3}$)

	OFF	ON			OFF
	8 Step	9 Step	10 Step	11 Step	12 Step
Kr	2.6985-j0.9964	1.6487+j0.2612	0.9837-j0.2864	1.0867+j0.2985	1.1835+j0.3049
Tr	-2.3859+j0.8811	-1.4577-j0.2309	-0.8638-j0.2532	-0.9608-j0.2639	-1.0464-j0.2835
	OFF				
	13 Step	14 Step	15 Step	16 Step	17 Step
Kr	1.2743+j0.3063	1.3594+j0.3034	1.4390+j0.2969	1.5134+j0.2874	1.5828+j0.2753
Tr	-1.1267-j0.2708	-1.2019-j0.2682	-1.2723-j0.2625	-1.3380-j0.2540	-1.3994-j0.2433
	OFF	ON			
	18 Step	19 Step	20 Step		
Kr	1.6476+j0.2612	1.2441+j0.3063	0.9830+j0.2863		
Tr	-1.4566-j0.2309	-1.0999-j0.2708	-0.8690-j0.2531		

TCSC의 제어기 정수 K_r 에 대해서는 전체 구간에 대해서 감도계수의 실수부가 (+)의 부호를 가지면서 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 시간구간에서 감도계수가 주기적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 또한 T_r 에 대해서는 전체 구간에 대해서 감도계수의 실수부가 (-)의 부호를 가지면서 시간구간에서 감도계수가 주기적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 연속시스템에서의 TCSC의 제어기 정수 K_r 과 T_r 에 대한 감도계수가 싸이리스터가 ON 또는 OFF인 경우에 서로 실수부의 부호가 반대로 나타난 해석결과와는 달리 진동모드의 주기적 변화에 따라서 감도계수도 실수부가 일정한 방향성을 가지면서 주기적으로 변화하고 있음을 나타낸다.

싸이리스터의 점화각이 126[°], 144[°], 그리고 162[°]인 경우의 TCSC 제어정수 K_r 에 대한 감도분석결과를 그림 5, 6, 그리고 7에 나타내었다.

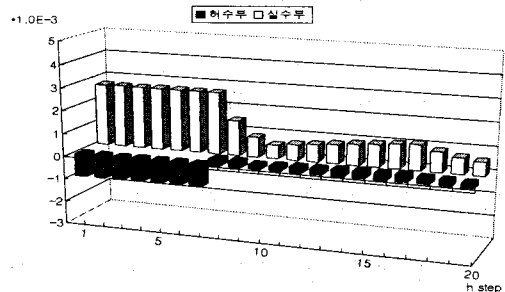


그림 5. 점화각 126(°)인 TCSC의 K_r 감도계수
Fig. 5. Sensitivity coefficient of K_r with 126(°) firing angle in TCSC

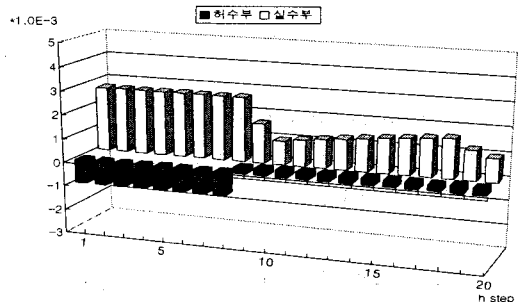


그림 6. 점화각 144(°)인 TCSC의 K_r 감도계수
Fig. 6. Sensitivity coefficient of K_r with 144(°) firing angle in TCSC

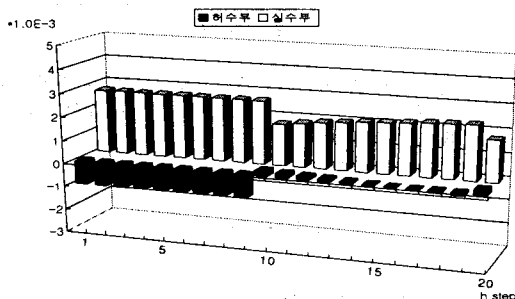


그림 7. 점화각 162(°)인 TCSC의 K_r 감도계수
 Fig. 7. Sensitivity coefficient of K_r with 162(°) firing angle in TCSC

그림 5는 그림 2에서 보인 것과 같이 TCSC 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 시스템이 안정한 영역에서 진동모드가 주기적으로 변화하고 있는 경우에 대한 TCSC 제어기정수 K_r 의 감도해석결과이며, 그림 6은 그림 3과 같이 시스템이 안정과 불안정을 주기적으로 반복하는 경우의 감도해석 결과이다. 또한 그림 7은 그림 4에서 보인 것과 같이 시스템이 불안정한 영역에서 진동모드가 주기적으로 변화하는 경우의 감도해석결과를 나타낸다.

그림 5, 6, 그리고 7에서 TCSC 싸이리스터의 점화각이 증가함에 따라서 제어정수 K_r 의 감도해석결과가 (+)의 실수부를 가지면서 시간구간에서 주기적으로 변화하는 것을 알 수 있으며, 연속시스템에서의 해석결과와 달리 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 감도계수의 실수부가 (+)의 일정한 방향성을 가지면서 주기적으로 변화하는 것을 보여준다.

같은 방법으로 싸이리스터의 점화각이 126[°], 144[°], 그리고 162[°]인 경우의 TCSC 제어정수 T_r 에 대한 감도해석결과를 그림 8, 9, 그리고 10에 나타내었다.

그림 8은 그림 2에서 보인 것과 같이 TCSC 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 시스템이 안정한 영역에서 진동모드가 주기적으로 변화하고 있는 경우에 대한 TCSC 제어기정수 T_r 의 감도해석결과이며, 그림 9는 그림 3과 같이 시스템이 안정과 불안정을 주기적으로 반복하는 경우의 감도해석 결과이다. 또한 그림 10은 그림 4에서 보인 것과 같이 시스템이 불안정한 영역에서 진동모드가 주기적으로 변화하는 경우의 감도해석결과를 나타낸다.

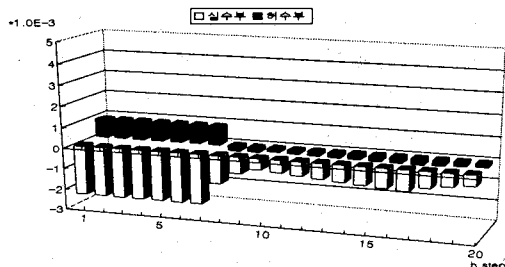


그림 8. 점화각 126(°)인 TCSC의 T_r 감도계수
 Fig. 8. Sensitivity coefficient of T_r with 126(°) firing angle in TCSC

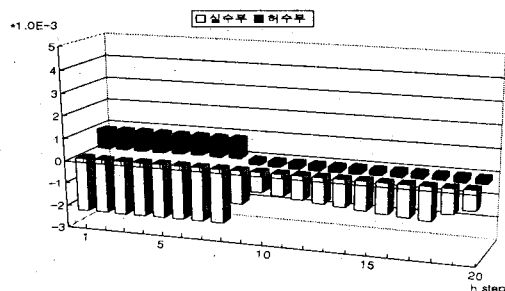


그림 9. 점화각 144(°)인 TCSC의 T_r 감도계수
 Fig. 9. Sensitivity coefficient of T_r with 144(°) firing angle in TCSC

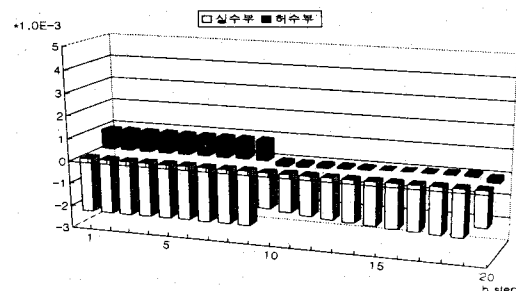


그림 10. 점화각 162(°)인 TCSC의 T_r 감도계수
 Fig. 10. Sensitivity coefficient of T_r with 162(°) firing angle in TCSC

그림 8, 9, 그리고 10에서 TCSC 싸이리스터의 점화각이 증가함에 따라서 제어정수 T_r 의 감도해석결과가 (-)의 실수부를 가지면서 시간구간에서 주기적으로 변화하는 것을 알 수 있으며, 연속시스템에서의 해석결과와 달리 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 감도계수가 (-)의 일정한 방향성을 가지

이산 전력시스템에서 TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 감도분석

면서 주기적으로 변화하는 것을 보여준다.

이러한 TCSC의 제어기정수에 대한 이산시스템에서의 감도계수 해석결과는 연속계통에서의 감도계수 해석결과와는 크게 다른 결과이며, 본 논문에서 사용한 이산시스템에서의 RCF 해석법에 기초한 감도해석 방법이 TCSC와 같이 주기적인 스위칭 동작을 하는 제어설비를 포함하는 전력계통의 진동모드와 감도해석에 매우 적합한 방법임을 입증하는 결과이다.

5. 결 론

본 논문에서는 직렬형 사이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC를 포함하는 전력계통에서 사이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화와 새로이 발생하는 불안정 진동모드에 대한 정확한 해석을 가능하게 하기 위해, 이들 스위칭 설비를 포함하는 전력계통을 이산 시스템으로 모델링하고 수학적으로 강한 특성을 갖는 RCF 해석법을 사용하여 이산 전력시스템의 정확한 미소신호 안정도 해석이 가능하도록 하였다. 또한 RCF 해석법에 기초한 감도해석 알고리즘을 제시하여, 이산시스템에서 고유벡터와 상태전이 방정식의 감도행렬로부터 중요 진동모드에 대한 감도계수를 구하여 불안정 진동모드에 가장 큰 영향을 미치는 제어기 정수의 선정과 진동현상의 원인분석이 가능하도록 하였다.

사례연구를 통하여 TCSC를 포함하는 이산 전력계통에 대한 감도해석 결과로부터 사이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 진동모드의 변화와 새로이 불안정 진동모드가 발생하듯이 감도계수도 기존의 연속시스템에서의 해석결과와 달리 일정한 방향성을 가지면서 주기적으로 변화하는 해석결과를 보이는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 본 논문에서 사용한 RCF 해석법에 의한 진동모드 해석과 감도해석 방법이 TCSC와 같이 주기적 스위칭 동작을 하는 FACTS 설비를 포함하는 이산 전력시스템의 안정도 해석과 안정도 향상을 위한 제어기정수의 감도해석에 매우 적합한 방법임을 나타내는 결과라고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제관리번호 : R-2005-7-127) 주관으로 수행된 과제입니다.

References

- [1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power system control and stability, Iowa state press, 1994.
- [2] "FACTS overview", IEEE power engineering society, 95TP108, 1995.
- [3] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, Wiley Inter-science, 2002.
- [4] Yousin Tang, A. P. Sakis Meliopoulos, "Power system small signal stability analysis with FACTS elements", IEEE Trans. on power delivery, Vol. 12, No. 3, pp.1352-1361, July 1997.
- [5] E. V. Solodovnik, G. J. Cokkinides, A. P. Sakis Meliopoulos, "On stability of implicit numerical methods in nonlinear dynamical systems simulation", Proc. of 13th Southeastern Symposium on System Theory, pp. 27-31, 1998.

◆ 저자소개 ◆

김덕영 (金德泳)

1964년 11월 22일생. 1988년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년 7월~2002년 8월 Georgia Institute of Technology 과학재단 Post-doc. Fellow, 1996년~현재 군산대학교 전자정보공학부 교수.