

우리나라 계통에서의 무효전력 수급현황 및 전압특성 분석

이주호, 정응수
한국전력거래소

Practical Applications of Reactive Power and Voltage Planning In Korea Power System

Lee Joo-Ho, Jung Eung-Soo
Korea Power Exchange

Abstract - This paper presents practical applications of reactive power and voltage planning to obtain voltage stability and operational voltage level for 2005 year summer peak Korea power system. It also describes the new electric facilities, operation criteria, voltage levels, MVAR flows, reactive power reserves in each control area. And reactive compensation devices are installed to maintain established voltage levels and stability margins. This simulation results show the improvement of voltage levels and the increase of reactive margins & interface flow margins. Finally, the paper reports the necessity of dynamic reactive reserves. It can be applied to analysis reactive compensation requirements and P-V & V-Q curves by PSS/E & VSAT.

1. 서 론

우리나라 전력계통은 부하의 대도시 밀집과 전원입지 부족에 따른 발전단의 편재현상으로 발전단과 부하단의 원격화가 심화되고 있다. 따라서 전력수요 증대를 위한 무효전력의 공급뿐 아니라 송전선로의 장거리화에 따른 계통 전압 유지에 위한 부하단에서의 직접적인 무효전력 보상 요구가 커지고 있다. 이러한 지역적인 무효전력의 공급은 전압 유지의 필수적인 요소임과 동시에, 송전선로 고장시 국부적인 무효전력 부족으로 인한 전압붕괴 현상[1-3]이 발생하지 않도록 전압안정도 검토에서도 필수적인 요소이다. 특히 냉방수요가 증가하는 여름철은 부하역률이 낮고, 또한 계통에 과부하가 발생하는 조건에서는 무효전력이 더욱더 지역적인 특성을 나타냄으로써 전력 소비지점 부근에서의 무효전력 공급이 중요시 된다. 즉, 하계 첨두부하시 부하 밀집지역이 일반적으로 동계 첨두부하시보다 전압불안정에 더 민감한 결과를 나타낸다. 따라서 계통운영자는 하절기 계통을 이용하여 제어지역의 무효전력 예비력과 전압을 검토하고, 계통의 안전운전에 필요한 대책방안 수립 및 지속적인 감시와 평가를 수행하고 있다.

본 논문은 '05년 우리나라 계통에서의 하절기 첨두부하시와 심야 경부하시 전력설비 신증설과 수요증가에 따른 지역별 무효전력 수급전망과 주요모선의 예비력, 전압특성 등을 파악하였으며, 정상시와 고장시 영향을 분석함으로써 무효전력 수급의 적정성과 전력계통 안전성을 확보하고 계통 신뢰도를 유지하고자 한다. 또한 적정 계통 전압과 고장시 전압안정성을 유지하기 위한 조상설비 소요량을 산정하여 조상설비 설치전후의 계통영향을 분석하였다. 이때 조상설비 소요량 산정과 V-Q 해석, 수도권 용통전력에 미치는 영향 등을 분석하기 위해서 PSS/E와 VSAT를 사용하였다[5,6,9,10].

2. 본 론

2.1 전력설비 신증설현황

전력수요의 지속적인 증가추세에 따라 '05년 6월까지

발전설비는 울진원자력 6호기(100만kW), 인천북항 #1Block(45만kW), 울춘복합 S/T(17.6만kW) 등 총 162.6만kW가, 송변전설비는 765kV 신가평-신태백T/L 가압('04.11), 345kV 신가평-미금T/L 준공('05.1)과 함께 765kV 신안성S/S #3M.Tr, 345kV 신안산S/S와 곤지암 S/S 및 관련T/L, 345kV 울진-신태백T/L 등이 준공될 예정이다. 조상설비 현황은 '04년 11월 준공 예정인 345kV 신성남S/S Sh.R 9만kVAr를 포함하여 표 1에 지역별로 정리하였다.

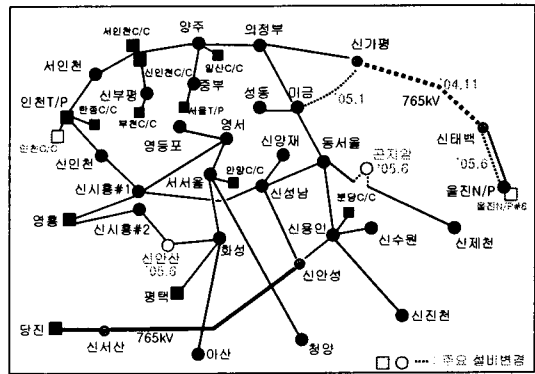


그림 1. 주요 전력설비 변경현황

표 1. 지역별 전압보상 설비현황

[단위 : 만kVr]

지역	수도권	영동	중부	호남	영남	계	
S.C	'03년	558.5	116.5	176.0	94.5	310	1,255.5
	'04년	601.5	203.5	229.0	97.5	347	1,478.5
	증가	43	87	53	3	37	223
Sh.R	'03년	492	24	103	43	242	904
	'04년	561	64	123	43	242	1,033
	증가	69	40	20	0	0	129

*'04년 12월말 기준

2.2 검토조건 및 기준

'05년도 하절기 계통의 첨두부하시 전력수요는 5,310만kW, 전국평균역률 91%(수도권 수요 2,230만kW, 점유율 42%)를 적용하였으며, 심야 경부하시 전력수요는 앙수동력 부하 228만kW를 포함하여 3,320만kW, 전국 평균역률 99%(수도권 수요 1,173만kW, 점유율 35%)를 적용하였다[4].

운전중인 발전기의 단자전압은 1.0pu로 가정하였으며, 전력시장운영규칙 "전력계통운영기준"에 따라 변전소의 전압조정은 2차측 모선전압을 목표로 하고, 조상설비 운전과 설치는 1차측 모선전압을 기준하였다. 공칭전압별 목표전압과 정상시 및 고장시 유지범위 기준은 표 2에 정리하였다.

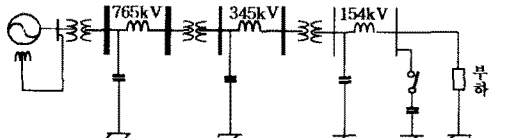
표 2. 전압별 운전기준 및 유지범위

공칭전압	운전목표전압	유지범위	고장시
765kV	765	726~800	726
345kV	353	336~360	336
154kV	-	156~164(중부하시) 152~160(경부하시)	146

2.3 전압 및 무효전력 수급전망

'05년도 전력설비 변경 및 수요증가를 고려하여 첨부 부하시 설비별 무효전력 수급상황 모의결과를 그림 2에 나타내었다. 이때 조상설비는 '04년말 설치기준으로 765kV 변전소에 운전중인 분로리액터가 포함된 값으로 모선전압에 따른 무효전력 실효값을 기준하였다. 먼저 무효전력의 공급은 발전기에서 전체의 29%, 선로 충전용량에서 41%, 조상설비에서 30%를 공급할 것으로 나타나며, 무효전력의 소비는 송변전설비에서 46%, 부하에서 56%를 소비할 것으로 전망된다.

소비	변압기	송전선	변압기	송전선	변압기	송전선	부하	계
626.1	64.7	800.7	232.7	200.1	2,376.6	4,269.6		
(%)	(15)	(2)	(2)	(15)	(5)	(5)	(56)	(100)



공급	발전기	충전용량	충전용량	충전용량	조상설비	계
1,243.6	201.6	833.8	707.6	1,283.0	4,269.6	
(%)	(29)	(5)	(20)	(16)	(30)	(100)

그림 2. 설비별 무효전력 수요 및 공급

첨두부하시 지역별 주요 345kV 모선 최저전압을 살펴보면, 표 3에 나타난 바와 같이 중부, 호남, 영남 지역은 수요증가에 따라 345kV 계통전압이 운전목표 이하로 저하하는 개소가 발생하였으나, 수도권 및 영동 지역은 시설 조상설비 운전만으로도 운전목표 전압을 유지할 수 있었다. 특히, 수도권 지역의 345kV 계통전압은 765kV 신가평-신대백T/L('04년 11월 준공) 운전으로 1~7kV 정도 정상시 운전전압은 상승하나, 고장시 무효전력의 불균형이 커져 전압안정성이 저하됨으로 SVC, FACTS, STATCOM 등과 같은 순동 무효전력 보상설비의 추가설치가 필요한 것으로 판단된다. 수도권 이외의 지역은 '05년도 무효전력 수요증가에 따른 적정 계통전압 유지를 위한 전력용 콘덴서 보강이 요구된다[7].

표 3. 첨두부하시 지역별 최저 345kV 모선 전압

구분	수도권	영동	중부	호남	영남
최저(kV)	353.3	355.6	350.7	347.1	344.8
모선	신안산	청원	신남원	신광주	신마산

심야 경부하시 주요 345kV 모선전압을 살펴보면, 표 4에서와 같이 지중케이블 선로가 많은 신양재 및 신성남 S/S가 계통전압 상승으로 전압제어를 위한 리액터를 추가로 설치할 필요가 있으며, 신고성S/S의 전압은 높게 유지되고 있으나 삼천포화력 발전소와 인접하여 전압제어가 용이하므로 별도의 대책이 필요하지 않은 것으로 판단된다.

표 4. 심야 경부하시 주요 345kV 모선 전압

구분	신양재	신성남	신고성
운전전력(kV)	356 ~ 363	354 ~ 359	355 ~ 358
모의결과(kV)	357	356	358

2.4 조상설비 소요량 및 효과분석

정상시 계통운영전압 유지를 위한 345kV 계통별 조상설비 소요량(S.C)은 총 138만kVAr로 산정되었으며, 이는 수도권 지역 신설 변전소인 신안산S/S 5만kVAr을 제외하고는 모두 중부, 호남, 영남지역의 전압유지를 위한 소요량이다. 고장시 운영기준 전압을 유지하기 위한 소요량은 총 32만kVAr로 765 및 345kV 병행 2회선 상정고장을 가정한 것이다. 표 5는 지역별로 산정된 조상설비 소요량을 정리하였다.

표 5. 지역별 조상설비 소요량

구분	지역	S.C					Sh.R
		수도권	영동	중부	호남	영남	
소요량	정상시	5	-	25	25.5	82.5	10
	고장시	5	10	10	4	3	
계		10	10	35	29.5	85.5	10

조상설비 투입후의 지역별 주요 345kV 모선전압의 개선결과를 표 6에 나타내었다.

표 6. 지역별 주요 345kV 모선 전압

구분	수도권	영동	중부	호남	영남	[단위: 만kVAr,kV]	
						전압(ΔkV)	모선
소요량	5	-	25	29.5	85.5		
전압	354.6	358.4	356.3	356.3	353.0		
	(+1.3)	(+2.8)	(+5.6)	(+9.2)	(+8.2)		
모선	신안산	청원	신남원	신광주	신마산		

심야 경부하시 리액터 투입량은 '04년 11월 준공 예정인 신성남S/S Sh.R 9만kVAr을 기설로 간주하여 추가 소요량에서 제외하였으며, 실제 계통 전압변동에 따른 여유(운전실적 및 PSS/E 모의결과)를 고려하여 신양재S/S에 10만kVAr을 설치하는 것으로 하였다.

표 7. Sh.R 투입량에 따른 모선전압

구분	신양재S/S		신성남S/S	
	투입량	전압	투입량	전압
기설 Sh.R	40(20*2)	357	12(3*4)	356
	40	355	12+9(4.5*2)	354
추가 소요량 (기설 Sh.R 투입)	3	354	-	354
	6	353	-	354
	9	352	-	353
	12	352	-	352

우리나라 계통에서 존재하는 가장 큰 송전혼잡의 요인은 수도권 용통전력의 전압안정도 한계에 해당한다. 이때 주로 사용되는 P-V 혹은 F-V해석은 부하공급 또는 전력전송을 위해 송전선로의 유효전력 전송능력을 결정하는 방법이다[8]. 조상설비 투입후의 수도권 용통전력 한계량 증가 효과를 VSAT을 이용하여 모의하여 보면 [5,9,10], 765kV 신대백T/L 2회선 고장시 가장 가혹한 조건이 되어, 조상설비 설치전 수전단 기준 한계량 1,048만 kW에서 조상설비 142.5만kVAr 설치후 1,092만kW로 44만kW가 증가되는 효과를 보였다. 이때 765kV 송전선로 상정사고시 고장과급방지장치 동작을 고려하여 765kV 변전소 345kV 모선의 Sh.R 연동차단과 수도권 지역 부하제한 60만kW를 적용하였으며, 발전기 차단에 따른 송전단 계통의 혼잡 개선효과는 고려하지 않았다. 그림 3은 765kV 신대백T/L 2회선 상정사고 전후와 조상설비 투입 전후의 345kV 신제천, 의정부 모선 전압과 용통전력(P-V, 혹은 F-V) 증가 효과를 나타내었다. 신대백T/L 고장시 의정부 모선보다 신제천 모선의 전압이 현격히 저하되는 것은, 의정부 모선은 양주와 미금에서 분산되어 조류가 유입되고 있으나, 신제천은 다른 공급 루트가 없어 765kV 송전선로에 흐르던 조류량의 대부분이 유입되기 때문이다.

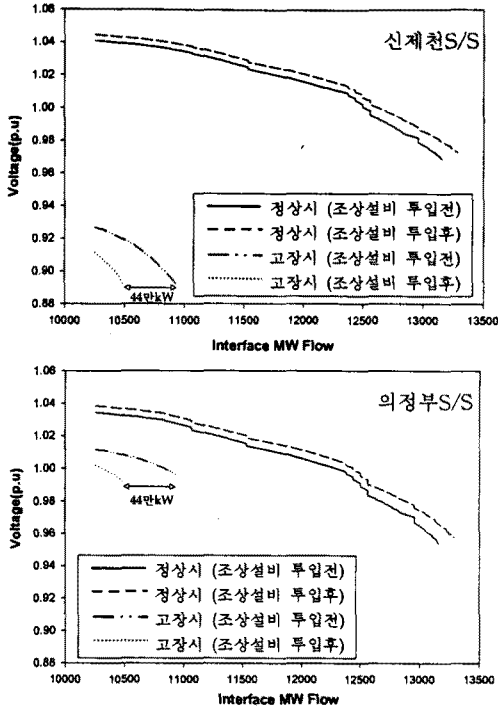


그림 3. 수도권 용통전력 한계 모의

수도권 용통전력 1,080만kW 수준에서 연계선로의 유효, 무효전력 흐름을 살펴보면, 그림 4와 같이 345kV 아산, 서청, 신계천T/L의 경우 무효전력 공급이 충분한 수전단(수도권 지역)에서 송전선로에 무효전력을 공급하는 것을 확인할 수 있다.

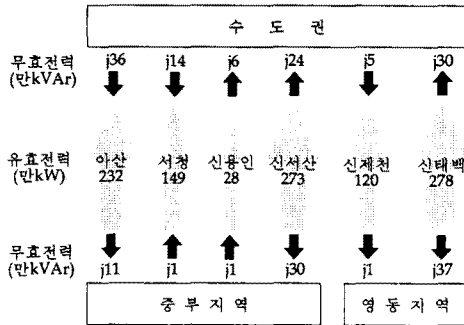


그림 4. 수도권 용통전력 흐름도

특히, 표 8에서와 같이 345kV 아산T/L(아산S/S-화성S/S) 양단 전압을 비교해보면 화성S/S(수도권)가 아산S/S(비수도권)보다 정상시 및 고장시 전압이 더 높으며, 고장시 저하되는 전압변동 폭도 작다. 즉, 정상시 및 고장시 전압유지를 위한 무효전력량은 충분하며, 추가 조상설비 투입시 목표전압을 초과하게 된다.

표 8. 345kV 아산S/S vs. 화성S/S 전압비교

구분	아산#1BUS	아산#2BUS	화성#1BUS	화성#2BUS
정상시	355.65	354.51	357.10	357.78
고장시	351.47	349.71	355.40	355.71
편차	-4.18	-4.80	-1.70	-2.07

그러나 그림 5, 표 9와 같이 VSAT을 이용하여 V-Q 해석을 통한 무효전력의 여유를 보면 위의 결과와 다른 양상을 보인다. V-Q해석은 모선에서 안정된 혹은 기준전압을 유지하기 위하여 그 모선에 필요한 주입 무효전력의 값을 산정하는 방법이다. 또한 임계점에서의 무효전력 여유와 임계전압을 산정하여 요구되는 운전전압 수준이 일반적인 계통상황의 변화와 상정사고에 대비하여 충분한 여유를 가지도록 임계전압보다 훨씬 위에 있어야 한다. 즉, 표 9에 나타난 바와 같이 전압유지를 위한 무효전력의 여유는 화성S/S(수도권)가 정상시나 고장시 더 많은 여유를 보이지만, 전압붕괴점(임계점)까지의 무효전력 여유는 더 적은 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 무효전력 조류개선 및 송전선로 고장시 수도권 계통의 전압안정성을 유지하기 위해서, 정상시 전압보상보다는 고장시 전압안정도를 위한 순동무효전력 보상설비가 필요함을 간접적으로 확인해 준다[3,5,9,10].

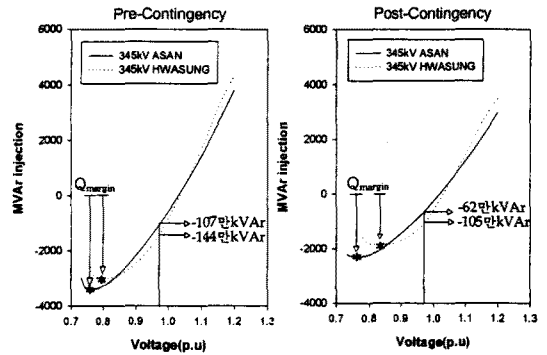


그림 5. V-Q 곡선(아산S/S vs. 화성S/S)

표 9. 무효전력 여유비교(아산S/S vs. 화성S/S)

구분	Q Margin (단위: 만kVAr)	
	(임계점* 기준)	(336kV 전압유지 기준)
정상시	아산S/S	-341
	화성S/S	-302
고장시	아산S/S	-231
	화성S/S	-186

조상설비 투입후 무효전력 여유의 증가를 확인하기 위해, 345kV 아산 계통지역에 10만kVAr의 S.C가 투입된 상태에서 정상시 및 상정고장시 V-Q해석을 수행하였다. 이때의 상정고장은 아산 모선의 무효전력에 가장 영향력이 큰 345kV 아산T/L 2회선 고장으로 선택하였다. 표 10과 그림 6에서 보는 바와 같이 전압붕괴점을 가리키는, 임계점까지의 무효전력 여유는 조상설비 투입에 따라 정상시 및 고장시 각각 18만kVAr, 15만kVAr 증가하였으며, 상정고장시 최소 336kV(=0.9739p.u) 이상의 전압을 유지하기 위한 무효전력 여유는 9만kVAr가 증가하였다. 이러한 계통 무효전력 예비력 증가를 전압안정도 여유(마진)가 증가되었다고 판단할 수 있다[3,5,9,10].

표 10. 무효전력 여유 증가

구분	Q Margin (단위: 만kVAr)		ΔQ	Q Margin (단위: 만kVAr)		ΔQ
	(임계점* 기준)			(336kV 전압유지 기준)		
정상시	투입전	투입후	-18	투입전	투입후	-11
	-323	-341		-96	-107	
고장시	투입전	투입후	-15	투입전	투입후	-9
	-216	-231		-53	-62	

2.5 발전기 무효전력 공급능력 검토

발전기 무효전력 공급능력은 무효전력 공급곡선에 따라 정격 유효전력 출력 및 정격 역률로 무효전력 공급 상한이 결정되나, 실제계통에서는 그림 7과 같이 원자력이

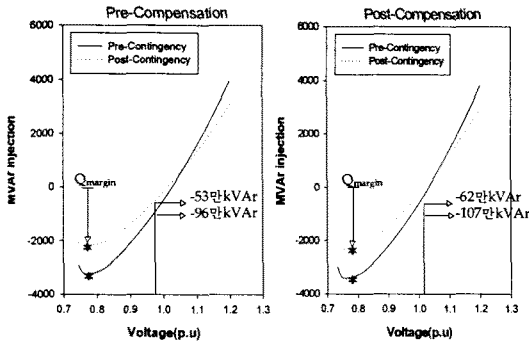


그림 6. V-Q 곡선(345kV 아산S/S)

나 석탄화력 발전소의 경우 정격 출력 이상으로 출력을 상향 운전하고 있어 공급곡선에 따라 무효전력 공급능력 상한이 급격한 감소를 보이게 된다. 따라서 출력 증가에 따른 경제적 이익을 기대할 수 있으나, 고장시 발전기 동적 무효전력 공급능력은 급격히 감소하여 전력계통 안정 운영에 부정적 영향을 끼칠 수 있으므로, 발전기 유효전력 출력과 단자전압 등의 복합적 영향을 분석할 필요가 있다. 이에 발전기 무효전력 공급능력 유지를 통한 고장시 운동 능력 확보를 위해, 전력거래소는 발전기 출력 상향운전시 무효전력 공급능력의 분석과 검증을 계획하고 있다. 그림 7은 원자력 발전기(정격용량:100만kW)의 무효전력 공급곡선에서 정격용량보다 유효출력 4만kW 상향운전(100→104만kW)했을 때 무효전력 공급능력이 약 7만kVAr 감소(46→39만kVAr)하는 예를 보여주고 있다.

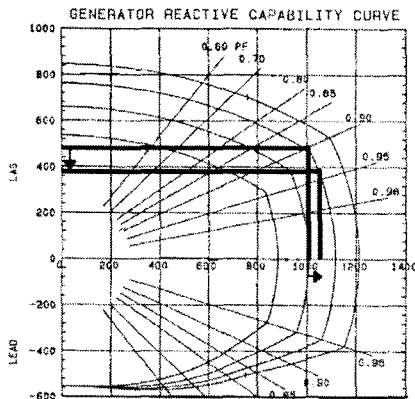


그림 7. 발전기 무효전력 공급곡선

3. 결 론

본 논문에서는 '05년 우리나라 계통에서의 전력설비 변경과 수요증가에 따라 하절기 첨두부하시 지역별 무효전력 수급현황과 주요모선의 예비력, 전압특성 등을 파악하고 사전 모의를 통한 고장시 영향을 분석하여 보았다. 정상시 및 상정고장시 운영기준 전압과 목표전압을 유지하기 위한 조상설비를 설치하였을 경우에, 계통 운영전압 유지 효과와 수도권으로 융통할 수 있는 한계전력 증가 효과 및 모선 무효전력 여유 증가를 확인하여 보았다.

송전선로 고장시 전압안정성 확보를 위해서는 조상설비를 최대한 많이 설치하여 운전해야 하나, 이는 정상시 수도권 계통전압 과다 상승으로 인해 한계가 있으며, 특히 765kV 등 대용량 송전선로의 고장시 무효전력 불

균형이 심화되어 계통이 불안정해질 수 있으므로, 수도권 연계선로에 순동무효전력 보상설비의 필요성이 커지고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 발전기 출력 상향운전시 발전기의 무효전력 공급능력 확보와 기타 순동 무효전력 공급원에도 많은 분석과 검증이 요구되며, 이를 통한 고장시 무효전력 운용능력을 유지해야 할 것이다.

최근 우리나라의 전력산업은 경쟁이라는 시장원리의 개념을 전력산업에 도입하는 큰 변화를 경험하고 있으며, 이로 인한 계통운영의 불확정성 증가와 다양한 조류 패턴 변화에 대비하여, 전력공급의 신뢰성 및 온건성 확보를 위한 계통 운영방안 수립이 필수적이다. 이러한 환경에서는 지역적인 무효전력 발전 및 공급원의 적절한 분배를 통한 무효전력 불균형 해소와 고장시 순동 무효전력 확보를 위한 지속적인 연구 및 검토가 더욱 필요할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [2] IEEE Working Group, "Voltage stability of power systems : Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience", IEEE Publication 90TH0358-2-PWR, 1990
- [3] T. Van Cutsem, C. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998
- [4] 한국전력거래소 계통운영처 수급조정팀, "05~06년 발전기 정지계획 검토", 2004년 8월
- [5] VSAT(Voltage Security Assessment Tool) Ver.4.0 User Manual, Publication of Powertech Labs Inc., 2004
- [6] PSS/E Ver.29 User Manual, Power Technologies, Inc., 2002년 10월
- [7] 한국전력거래소 계통운영처 계통기술팀, "2005년도 무효전력 수급계획 검토", 2004년 9월
- [8] B. Lee, H. Song, S. Kim, S-H. Kwon, G. Jang, V. Ajarapu, "A Study on determination of interface flow limits in the KEPCO system using the modified continuation power flow(MCPF)", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 17, No. 3, Aug. 2002, pp 557-564
- [9] B. Gao, G.K. Morison, P. Kundur, "Towards the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large-scale power systems", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 11, No. 3, Aug. 1996, pp 1314-1324
- [10] L.C.P da Silva, Y. Wang, V.F. da Costa, W. Xu, "Assessment of generator impact on system power transfer capability using modal participation factors", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 149, issue. 5, Sep. 2002, pp. 564-570