

서부경남지역 전력계통의 최적전압 보상에 관한연구

정윤기*, 김승환*, 유인근**
한국전력공사*, 창원대학교**

A study on optimal voltage compensation method in west Gyeongnam power systems

Yun-ki Joung*, Seng-Hwan Kim*, In-keun Yu**
KEPCO*, Changwon National University**

Abstract - In recent years, electric power quality has become an important issue in power system. Voltage variation and compensation countermeasures of KEPCO system in west Gyeongnam have been simulated using PSS/E. In this paper, in the abnormal power system, the adaption of SVC, high speed and continuous control are simulated for voltage compensation. It is shown that the SVC is the optimal voltage compensation method in loop power system or 2 lines radial system.

단자전압이 상승하면 과여자 되며, 전압 파형이 일그러져 고조파의 원인이 된다. 이러한 전압 변동이 기기에 미치는 영향은 표 2에서 나타나었다.

1. 서론

최근에 전력계통에서 전력품질에 대한 문제는 중요한 부분으로 인식되고 있다[1-3]. 이러한 전력품질의 문제들 중 순시전압 강하가 가장 빈번하게 발생되고 있으며, 전력 설비에 나쁜 영향을 미치는 것으로 보고되어지고 있다[4,5]. 따라서 본 논문에서는 서부경남 지역의 실 계통을 전력현상 해석용 프로그램인 PSS/E에 적용하여 현재 사용되고 있는 전력용 콘덴서의 전압보상 방안과 SVC를 이용한 전압보상을 시뮬레이션 하여 그 결과를 비교하였다. 또한 이 시뮬레이션의 결과 SVC를 이용한 전압보상이 과거의 방법보다 더 효율적이라는 것을 입증하였다.

표 1 전압변동의 유형

유형		일반적 변동주기	전압 변동폭
단시간 변동	순시변동 (instantaneous)	차단 (interruption)	0.5~30 사이클
		전압강하 (sag, dip)	0.5~30 사이클
		전압강하 (swell)	0.5~30 사이클
	순간변동 (momentary)	차단 (interruption)	3초
		전압강하 (sag, dip)	3초
		전압상승 (swell)	3초
	일시변동 (temporary)	차단 (interruption)	3초~1분
		전압강하 (sag, dip)	3초~1분
		전압상승 (swell)	3초~1분
장기간 변동	지속차단(interruption, sustained)	1분초과	
	부족전압(undervoltage)	1분초과	
	과전압(overvoltage)	1분초과	
전압불평형	전압불평형(voltage unbalance)	전상상태	

2. 전압변동 원인 및 특성

2.1 전압변동의 요인과 유형

수요의 변화에 따라 부하에서 소비될 무효전력도 변화한다. 이 때문에 전압조정을 행함에 있어서 부하에 의한 전압변동 특성을 이해하는 것이 필요하다. 또한 전압 변동에 관한 유형을 살펴보면 단기간 전압변동과 장기간 전압 변동현상으로 분류할 수 있고 이를 정리하면 표1과 같다. 단기간 전압변동은 주로 시스템 고장이나 큰 기동전류를 필요로 하는 부하의 투입 또는 전력선의 일시적인 단선 등으로 인해 발생하는 현상이다. 또한 전압변동의 지속시간에 따라 순시(instantaneous), 순간(momentary), 일시(temporary)전압변동과 같이 구분하고 있다. 그리고 장시간 전압 변동은 1분을 초과하여 그 실효치의 값이 변동하는 경우를 말하며 이는 일반적으로 시스템의 고장이 그 원인이라기보다는 시스템 상에서 부하변동이나 시스템의 스위칭 동작으로 인해 발생하는 것으로 볼 수 있다. 3상 계통에서 어떤 상의 전압 변동폭이 정상상태와 비교하여 0.5~2(%로 변화하면 불평형이라 한다[6,7].

2.2 전압변동이 전력계통 및 기기에 미치는 영향

계통전압이 저하하는 경우 송전손실 증가, 송전용량의 저하, 계통안정도의 저하, 계통 기기의 부적정 가동 등의 결과를 초래하고 반면 계통전압이 상승하는 경우 계통기기의 열화를 촉진하고, 철심을 사용한 계통기기는

표 2 전압변동이 기기에 미치는 영향

기기 종류	영향	비고
형광등 · TV	밝기의 변화, 휘도의 변화에 의해 불쾌감 초래	깜빡거림은 전압변동의 주기가 10Hz일 때 가장 현저
컴퓨터	연산에러 또는 기능 정지	안정화전원(UPS등)이 필요
압연 설비	제어회로의 오동작으로 인한 제품의 불량 또는 설비 정지의 원인	재기동시 까지 장기간의 시간 소요
유도 전동기	회전의 불규칙, 과부하운전의 원인	전동기 재기동시까지 장기간 소요
산업용 로봇	도장용 로봇이나 NC 조작 기계와 같은 산업용 로봇에서는 도장 불균일이 발생하거나 제작 정밀도에 문제 발생	
수은 램프	20~30%의 전압강하가 0.05~1초간 계속되면 소등된다.	재점등시 까지 수십~수십분의 시간이 소요
시험 설비	입력전압의 변동으로 정밀도의 저하	안정화 전원이 필요

2.3 계통전압과 무효전력

계통전압변동의 원인은 대부분의 경우 무효전력의 변화에 기인하고 있다. 그림 1은 무한대 모선의 모델을 나타내었고 그림 2는 무한대 모선의 벡터도를 나타낸다.

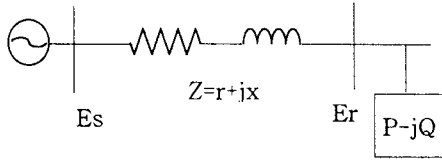


그림 1 부하, 무한대 모선 모델계통

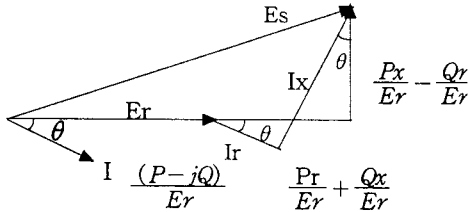


그림 2 부하, 무한대 모선 모델계통의 벡터도

송전단 전압을 E_s , E_r 이라 하고 E_r 를 기준으로 E_s 의 관계식을 표현하면

$$E_s = E_r + (r + jx) \left(\frac{P - jQ}{E_r} \right) \\ = E_r + \left(\frac{Q}{E_r} X + \frac{P}{E_r} r \right) + j \left(\frac{P}{E_r} x - \frac{Q}{E_r} r \right) \dots (2.1)$$

여기서 절대치 E_s 를 생각하면

$$E_s^2 = \left(E_r + \frac{Q}{E_r} X + \frac{P}{E_r} r \right)^2 + j \left(\frac{P}{E_r} x - \frac{Q}{E_r} r \right)^2 \dots (2.2)$$

이것을 변형하여

$$E_s^2 \cdot E_r^2 = (Pr + Qx + Er^2)^2 + (Px - Qr)^2 \dots (2.3)$$

지금 E_s 를 일정하게 하고 $P \cdot Q$ 가 미소하게 ΔP , ΔQ 만큼 변화한 때에 전압 E_r 의 변화를 고찰하여 보자. 유효전력 P 가 ΔP 만큼 변화한 때에 수전단 전압 E_r 의 변동을 ΔE_r 이라 한다면

$$\Delta E_r = \left(\frac{\partial E_r}{\partial P} \right) \Delta P \dots (2.4)$$

또 무효전력 Q 가 ΔQ 만큼 변동하여 수전단 전압 E_r 의 변동을 ΔE_r 이라 한다면

$$\Delta E_r = \left(\frac{\partial E_r}{\partial Q} \right) \Delta Q \dots (2.5)$$

식 (2.3)~(2.4)로부터 ΔE_r 과 ΔP , ΔE_r 과 ΔQ 를 구하면

$$\Delta E_r = \left[- \frac{(r^2 + x^2)P + rEr^2}{Er(2Er^2 + 2rP + 2xQ - Es^2)} \right] \Delta P \dots (2.6)$$

$$\Delta E_r = \left[- \frac{(r^2 + x^2)Q + xEr^2}{Er(2Er^2 + 2rP + 2xQ - Es^2)} \right] \Delta Q \dots (2.7)$$

유효전력과 무효전력이 전압변동에 미치는 영향을 보기 위하여 식 (2.6)와 (2.7)의 비를 생각하여 보면 다음과 같다.

$$K = \frac{\text{유효전력의 변화에 의한 전압변동}}{\text{무효전력의 변화에 의한 전압변동}} \\ = \frac{[(r^2 + x^2)P + rEr^2] \Delta P}{[(r^2 + x^2)Q + xEr^2] \Delta Q} = \frac{[(Z^2 P + rEr^2)] \Delta P}{[(Z^2 Q + xEr^2)] \Delta Q} \dots (2.8)$$

여기서 유효전력의 변화 ΔP 와 무효전력의 ΔQ 가 같다고 하면 1차계통의 리액턴스 x 는 저항 r 에 비하여 약 5~10배 정도 크므로 r 을 무시하면 $\sqrt{r^2 + x^2} = z \approx x$ 가 되기 때문에 K 는 다음과 같이 된다.

$$K = \frac{x^2 P}{x^2 Q + xEr^2} = \frac{P}{Q + \frac{Er^2}{x}} \dots (2.9)$$

$\frac{Er^2}{z}$ 은 E_r 점의 단락용량을 표시하는 것으로

$$\frac{Er^2}{x} \gg P, \quad \frac{Er^2}{x} \gg Q$$

가 되므로 $K \approx \frac{P}{Er^2} \ll 1$ 이 된다.

이로부터 1차계통에서 전압변동에 미치는 유효전력 변동의 영향은 무효전력 변동에 비하여 적다는 것을 알 수 있다. 더욱이 이 비율은 유효전력과 E_r 점의 단락용량비로 생각해도 좋으며, 단락용량의 크기만큼 유효전력과 비교한 무효전력이 전압변동에 미치는 영향은 크게 되기 때문에 주간선 계통의 전압변동은 유효전력보다도 무효전력에 영향을 받게 된다.

3. 전력계통 모델링

3.1 서부경남지역 전력계통 특성

서부경남지역의 발전력은 대규모 발전단지인 삼천포 화력(설비용량:3,240MW)와 하동화력(설비용량:2,500MW)를 비롯하여 합천수력, 남강수력으로 구성되어 있으며 발전소별 설비 현황은 표 3과 같고 표 4는 서부경남 지역의 주요부하 현황을 나타낸다.

표 3 서부경남 지역 발전소 현황

발전소명	설비용량 [MW]	상시출력 [MW]	연계 S/S	비 고
삼천포T/P (6기)	3,240	3,240	신마산, 신고성, 신김해	
하동T/P (4기)	2,500	2,500	의령, 하동	
합천H/P (2기)	101	101	합천	
남강H/P (2기)	14	14	개양	23/66kV 와 연결
신동 에너지	42.6	25.0	진주	154kV 신동T/L
합 계	5,897.6	5,879	8개 S/S	

표 4 서부경남 지역 주요부하 현황

주요계통조류(MW)		주요부하(MW)	
삼천포 T/L	1,460	창원기계공업단지 (814개 업체)	650
해 북 T/L	600	마산수출 자유지역 (76개 업체)	62
삼 해 T/L	1,160	진주 상평공단 (312개 업체)	85
하 령 T/L	1,340	기 타 일 반 부 하	1,550
대구계 T/L	970/540	합 계	2,347

3.2 서부경남지역 전력계통의 PSS/E 모델링

서부 경남 전력계통에서 전압변동을 시뮬레이션하기 위하여 삼천포화력 발전소를 포함한 거제, 충무, 고성지역을 모델링 하였다. 이 지역의 변전소는 345kV 삼천포 화력 발전소 계통과 연계되어 있으며 154kV 2회선 방사상 계통으로 3개 변전소에 부하를 공급하고 있다. 또한 발전력이 풍부한 남부지역 계통에서는 보기 드물게 비정상 계통시 무효전력을 보상하기 위해 용량이 큰 154kV급 및 23kV급 전력용 콘덴서를 다수 운전(거제 S/S : 70MVAR, 고성S/S : 20MVAR) 하고 있으며, 154kV로 공급을 받고 있는 전기 다소비 산업체인 조선소가 있어 인근계통에서 고장발생시 전압변동을 고찰하기가 용이하고, 휴전작업등으로 인해 송전선로 1회선 개방시 전압변동이 심하여 최적전압 보상방안 연구를 위한 모델링 계통으로 선정하게 되었다.

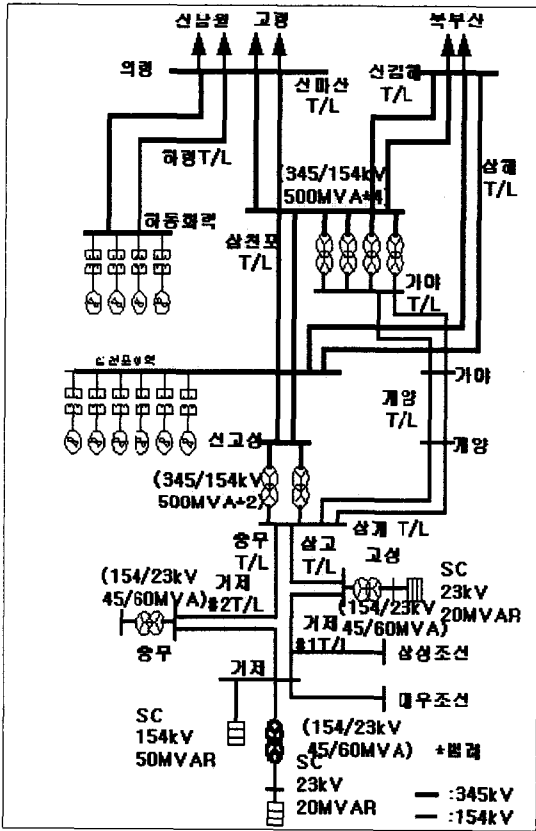


그림 3 PSS/E 모델링을 위한 삼천포, 고성, 거제, 충무지역 계통도

4. 기존의 전압보상 방법에 의한 결과분석

모델 계통에서는 기존의 전압보상 방법인 발전기에 의한 전압조정, 변압기(TAP)에 의한 전압조정, 전력용 콘덴서에 의한 전압조정에 의한 결과를 표 5에 나타내었고 그림 4에서는 정상상태의 계통전압을 PSS/E로 시뮬레이션 하였다.

표 5 전압 보상 방안별 전압 비교

계통 조건	전압보상 방법	전압(PU, kV)						
		삼천포 345	신고성 154	고성 154	고성 23	충무 154	거제 154	
정상 계통	없음	kV 1.043 pu 360.0	1.043 360.0	1.015 156.3	1.006 23.13	0.999 153.9	0.986 151.9	
충무 T/L Off	없음	kV 1.043 pu 359.7	1.043 160.6	0.960 147.8	0.947 21.79	0.861 132.6	0.875 134.7	
	삼천포T/P 발전기 단차 전압 상향조정	kV 1.043 pu 359.8	1.044 160.8	0.962 148.1	0.950 21.84	0.864 133.0	0.877 135.1	
	신고성 345kV MTr Tap 상향조정	kV 1.042 pu 359.4	1.076 165.8	1.000 153.9	0.990 22.76	0.908 139.9	0.921 141.9	
	고성, 거제, 대우조선	kV 1.045 pu 360.4	1.053 162.1	1.020 157.0	1.070 24.60	0.969 149.2	0.981 151.1	
	각각 23kV SC 20MVAR운전	kV 1.043 pu 359.8	1.044 160.8	0.962 148.1	1.011 23.25	0.864 133.0	0.877 135.1	
	거제50, 고성20, 대우 20MVAR운전	kV 1.045 pu 360.7	1.057 162.8	1.045 160.9	1.098 25.25	1.021 157.3	1.033 159.0	

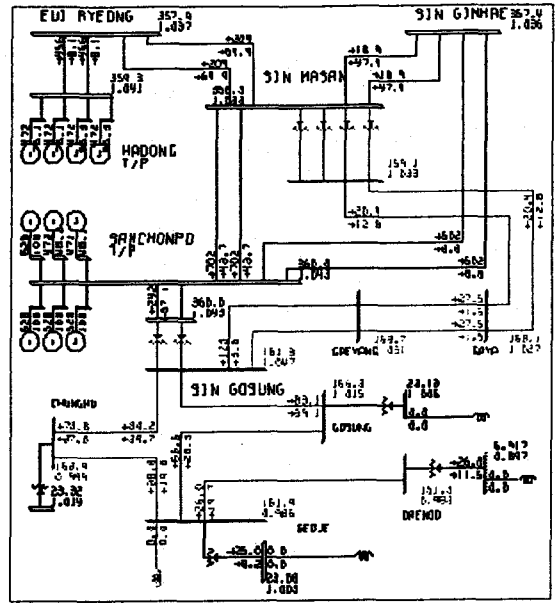


그림 4 정상상태의 계통 전압

5 SVC(Static Var Compensators) 적용

5.1 SVC 특성 및 종류

전력계통에서 요구하는 무효전력을 공급하기 위해 종래에는 주로 동기조상기가 사용되어져 왔으나 무효전력 발생의 속응성, 유지보수 등의 문제점이 있었다. 이 결점을 해결하기 위하여 근래 정지형 무효전력 보상 장치가 사용되어지고 있다. 표 6에서는 무효전력 및 전압제어 설비를 비교하였다. 현재 한전 서대구 변전소에 실제 적용 운용되고 있으며, 앞으로 전력계통이 복잡화, 대형화 될수록 사용빈도는 더욱 많아질 것이다.

표 6 무효전력 및 전압제어 설비 비교

비교항목	무효전력 출력	기동 시간	응답속도	전력 손실	설치비	유지보수
SC	V^2	CB	3-5cycle	적용	저가	적다
SH/R	비례	개폐시간				
동기조상기	용량범위 한도	10분	0.1-2초	많음	고가	많다
SVC	V^2 비례	0.1초	0.01초 이하	적용	고가	적다

본 논문에서는 대구지역에서 실제 운전중인 TCR(Thyristor Controlled Reactor)과 TSC(Thyristor Switched Capacitor)방식을 혼합한 Hybrid 방식의 SVC를 동일한 사양으로 서부경남 지역 전력계통에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 5는 Hybrid SVC의 구성 방식을 도시한 것이고 표 7은 SVC를 형태별로 비교하였다.

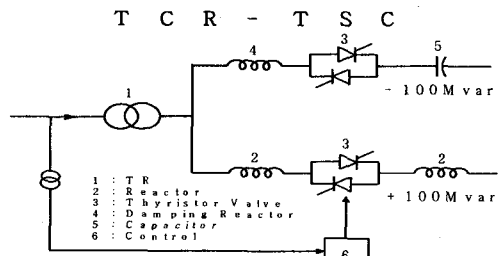


그림 5 Hybrid SVC의 구성 방식

표 7 SVC 형태별 비교

비교 항목	TCR/FC	TCR/TSC	TCR/MSVC
손실	-무출력상태에서 높은손실 -유도성 출력시 손실증가	-무출력상태에서 낮은손실 -용량성, 유도성출력 증가시 손실증가	-무출력상태에서 낮은손실 -용량성, 유도성출력 증가시 손실증가
고조파 발생	-큰용량의 TCR사용 -고조파 많음	-적용량의 TCR사용 -고조파 적음	-큰용량의 TCR사용 -고조파 많음
외란에 대한 안정도	-나쁨 -계단전압변화나 고장에서 FC 응답이 나쁨	-좋음 -과도현상의 최소화를 위해 콘덴서 조정	-나쁨 -기계식 차단기로 제어
제어 형태	연속제어	연속제어	제어범위가 TCR로 한정
적용 제어	전압보상 SSR 제어	전압보상 계통동요 제어	전압보상
설치 가격	최저	고가	저가
기타	차단기 보수필요	차단기 보수 불필요	차단기 보수 필요

본 논문에서 적용된 SVC 시스템 특성과 배치도는 표 8과 그림 6과 같다.

표 8 적용된 SVC 시스템 특성

서대구 SVC 시스템 사양	MTR : 345/13.5kV, 3상 105MVA, ex = 10%, YO/d1
	TCR:100[MVar] TCR의 리액터 L = 13.05 mH/Δ
	TSC:100 MVar TSC의 콘덴서 C = 422.9 μF/Δ, 리액터 L = 0.82 mH/Δ
연계전압	345kV, 3상, 60Hz (1.0 p.u.)
연속 정격 운전범위	100Mvar (Inductive), 100Mvar (Capacitive)
파부하조건	TSC는 일차전압이 518kV(1.5p.u.)에서 1초후 차단(완전 Capacitive)

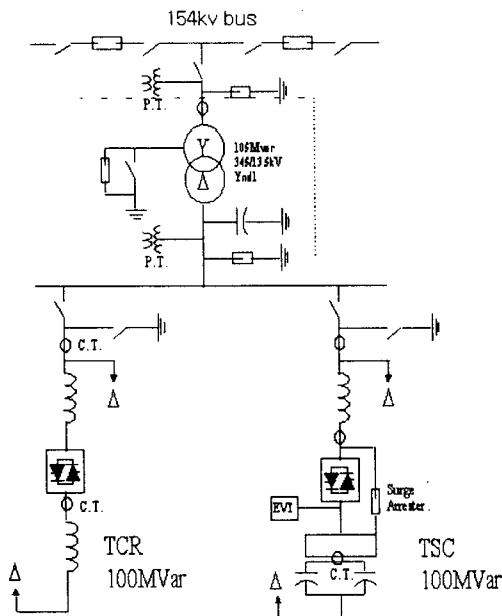


그림 6 SVC 배치도

5.2 SVC를 적용한 시뮬레이션

PSS/E를 활용하여 SVC를 적용한 Simulation은 거제S/S 154kV 전압변동범위를 1.04~1.01 (160.16~155.54kV)로 고정한 후에 정상계통에서 과전압이 발생하였을 경우와 비정상계통(충무T/L 개방)에서 저전압이 발생할 경우로 구분하여 전개하였다. 과전압 보상의 경우 신고성S/S의 154kV 전압을 1.110(171.0kV) 까지 상승시키면 거제S/S 154kV 전압이 1.055(162.5 kV)로 전압 유지범위를 벗어나기 때문에 SVC가 Reactor 역할을 수행하여 21.5(MVAR)가 계통에 투입되어 거제S/S 154kV 전압을 1.038(159.8kV)으로 Down시켜 최적전압을 유지하였다. 저전압 보상의 경우 154kV 충무T/L이 개방되어 있는 상태에서 거제S/S의 전압이 0.877(135.1kV) 까지 저하되면 SVC가 Condenser 역할을 수행하여 51.5(MVAR)가 계통에 투입되어 거제S/S 154kV 전압을 1.010(155.5kV)로 Raise시켜 최적전압을 유지하였다.

SVC를 모든 변전소에 설치하면 가장 이상적이지만 경제성을 고려하여 전압변동이 심한 지점인 거제S/S에 설치, 운용한다면 최적 전압을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있었다..

6. 결 론

본 논문에서는 서부 경남지역의 전력 계통에 고속도, 연속제어방식인 SVC를 적용하여 비정상 계통에서 전압 보상을 시뮬레이션 한 결과 종래의 발전기, 변압기, 전력용콘덴서에 의한 전압 보상 방법보다 Loop 계통은 물론 전압 변동이 심한 2회선 방사상 선로에서도 최적 전압 보상이 우수하다는 것을 증명하였고 또한 경제성을 고려하여 전압 변동이 가장 심한 거제변전소에 설치, 운용시 가장 최적의 전압제어를 할 수 있음을 알 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Math H. J. Bollen "Understanding Power Quality Problems Voltage Sags and Interruptions" IEEE, Inc., New York, 2000.
- [2] A. A. Chowdhury, Don O. Koval "Value-Based Distribution System Reliability Planning" IEEE, Trans, Vol 34, No 4, pp23~29, 1998.
- [3] C.A. Warren, J.J. Burke, H.Morosini, C.W. Burns "Power Quality at Champion Paper-The Myth and the Reality" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No.2, pp. 636-641, April 1999.
- [4] IEEE Standard 1346, "IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment" 1998
- [5] Carl Becker, William Braun Jr, "Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags(Dip) in Revision to IEEE Std 493, the Gold Book" IEEE Transaction on Industry application, vol. 30, No. 3, May/June 1994
- [6] R. C Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty "Electrical Power Systems Quality" McGraw-Hill, New York, 1996.
- [7] Mario Fabiano Alves, Tatiana Nesralla Riberiro, "Voltage Sag : An Overview of IEC and IEEE Standards and Application Criteria" IEEE, pp585~589, 1999
- [8] Power Technologies INC, "PSS/E PSS/MT/IPLAN /TMLC" 1992
- [9] Power Technologies INC, "PSS/E Installation/Utilities /Indeplot" 1992
- [10] Power Technologies INC, "PSS/E Program Application Guide" 1992