

동적전압붕괴에 대한 외란의 영향평가 및 제어기기 적용효과 분석

이근준, 추진부, 김건중
전력연구원, 충남대학교

The Analysis and Evaluation of the Disturbances and Controller Effects to Power System Dynamic Voltage Stability

Geun-Joon LEE, Jin-Bu Choo, Kern-Joong Kim
Korea Electric Power Research Institute, ChungNam Univ.

Abstract - This paper presents shows various process of dynamic voltage collapses which were initiated by power system disturbances, and the impacts of dynamic voltage controllers.

According to the analysis results, the composition of induction motors with short time constant strongly affect the voltage collapse.

To escape the voltage collapse, adding fast acting reactive compensation device, such as SVC, at high reactive loss sensitivity($\partial Q_{loss}/\partial PL$) point could be one of a good countermeasure.

감도지표($\partial Q_{loss}/\partial PL$)를 고려하여 SVC를 투입하고 그 시정수를 조정한 결과 신속한 SVC의 제어에 의해 전압붕괴를 방지할 수 있음을 보였다.

2. 전압안정성 해석기법

본 논문에서 제시하고자 하는 전압안정도 모의기법은 준동적 전압안정도 해석기법에 의하였다. 해석방법은 기본적으로 부하가 증가하는 상황에서 계통요소의 탈락이 미치는 영향을 고려하도록 하였다. 계통의 전압불안정 상태를 정량적으로 평가하기 위하여 무효전력손실감도지표를 전압안정성 평가지표로 활용하였다.

또한 모델계통에서 어떤 기간동안 부하증가가 지속되는 경우, 이를 추적하면서 전압안정도를 평가, 제어할 수 있도록 하는 엘고리즘과 프로그램 및 사례해석 결과에 대하여 설명하도록 한다.

1. 서 론

전압붕괴에 의한 전력계통의 대규모 정전은 오늘의 전력계통계획 및 운용에 있어 최대의 관심사항이 되고 있다. 우리나라와 같이 송전계통이 다중 환상 루프화 되어있는 계통은 전력의 용통이 자유로운 대신 국부지역의 사고가 대규모로 파급될 수 있는 가능성이 있으며, 빠른 속도로 진전되는 위상각 안정도문제보다는 비교적 느린 속도로 확산되는 전압 불안정에 대한 우려가 크다.

전압안정도 문제는 발전기, 송전시스템, 부하의 무효전력 수급 불균형에 의해 발생함은 잘 알려진 사실이지만, 이들의 Dynamic는 계통의 특성과 각 제어기기의 복잡한 상호작용에 의해 결정되므로 모의 및 그 분석이 용이하지 않으며, 따라서 전압붕괴에 대한 대책 수립도 많은 어려움이 있어왔다.

본 논문에서는 각종 외란(단순부하증가, 선로탈락, 조상설비정지, 발전기 정지)들이 전압붕괴 매카니즘을 모의함으로써 외란에 따른 계통의 무효전력 수급상황의 변화 및 전압붕괴의 진전과정을 밝혔으며, 전압붕괴를 제어하기 위한 제어기기(SVC, OLTC) 효과를 분석하였다.

전압붕괴 방지를 위한 대책으로 최대무효전력손실

2.1 전압안정성 평가지표

전압붕괴현상이 계통손실의 급격한 증가에 기인한다는 데 착안하여 유효 및 무효전력 손실감도를 구하였다.

무효전력 손실 최소화 모형은

$$\text{최소화 : } Q_{LOSS}(P_L, Q_L, V, \theta)$$

$$\text{제 약: } P(V, \theta) = P_{SPEC} \tag{2.1.1}$$

$$Q(V, \theta) = Q_{SPEC}$$

라그랑지안 함수 L 은

$$L = Q_{LOSS}(V, \theta) + \lambda_p \{P(V, \theta) - P_{SPEC}\} + \lambda_q \{Q(V, \theta) - Q_{SPEC}\} \tag{2.1.2}$$

이 경우 다음과 같은 최적화 조건이 성립한다.

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \theta} \right] = \left[\frac{\partial Q_{LOSS}}{\partial \theta} \right] + \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right]^T \lambda_P + \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right]^T \lambda_Q = 0$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial V} \right] = \left[\frac{\partial Q_{LOSS}}{\partial V} \right] + \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right]^T \lambda_P + \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right]^T \lambda_Q = 0$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \lambda_P} \right] = [P(V, \theta) - P^{SPEC}]$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \lambda_Q} \right] = [Q(V, \theta) - Q^{SPEC}]$$

윗식을 행렬식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L}{\partial V} \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{LOSS}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q_{LOSS}}{\partial V} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.1.4)$$

단 J 는 자코비안 행렬로 다음과 같다.

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{pmatrix} \quad (2.1.5)$$

따라서 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값은

$$\begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.1.6)$$

로 되며, 이 라그랑제 승수 λ_P, λ_Q 는 최적화 문제에서는 유효, 무효전력의 편차에 대한 무효손실의 증분을 나타내는 co-state 벡터로서 무효전력손실 감도계수와 일치하며, 이것의 최대값을 취하여 VCPI로 정의하고 정적전압안정도 평가지표로 활용한다.

2.2 전압안정도 해석 알고리즘

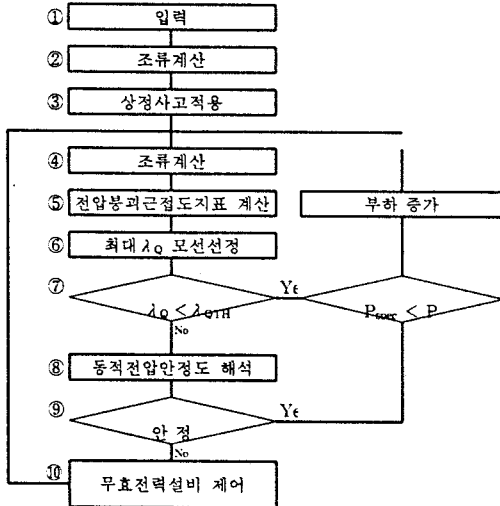


그림 1 전압안정도 해석 알고리즘

전압안정도 해석 알고리즘은 그림 1과 같다. 이중 ①~⑥은 계통의 조류계산과 VCPI(Voltage Collapse Proximity Indicator)를 계산하는 부분으로 정상상태계통이 전압붕괴에 근접해 있는 정도를 나타내는 정적 해석 모듈이다. ⑧, ⑨는 시스템의 동적특성 추적과 안정성 여부를 판단하는 동적해석 모듈이다. 해석결과 동적전압 불안정이 발생한 경우 부하차단, 커패시터의 투입, SVC, STATCOM등을 사용하여 일정수준의 안정성 제어를 하는 것이 필요하며, 이 부분을 제어모듈이라 한다.

2.3. 모형계통 해석

계통외란이 전압붕괴에 주는 영향을 검토하기 위하여 그림 3의 14모선 모형계통을 활용하였다.

2.3.1 입력데이터

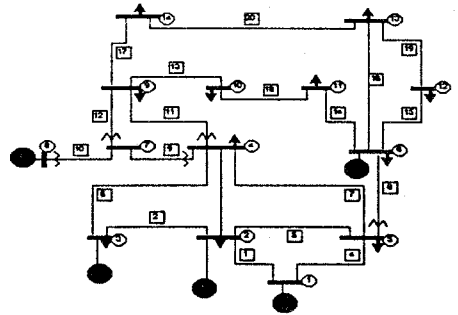


그림 2. IEEE 14 모선 모형계통

2.3.1.1 조류계산 입력데이터

표 1(a) 14모선 모의계통 모션데이터

모션	ID	V [p.u]	θ	P _g [MW]	Q _g [Mvar]	P _d [MW]	Q _d [Mvar]	CP
1	1	1.0500	0.000	96.6	3.8	0.00	0.0	0.00
2	2	1.0400	-1.800	60.0	34.1	21.7	12.7	0.00
3	2	1.0100	-5.000	70.0	35.0	94.2	19.0	0.00
4	3	1.0020	-4.800	0.0	0.0	47.8	25.0	0.00
5	3	1.0120	-4.400	0.0	0.0	27.6	11.6	0.00
6	2	1.0400	-6.400	80.0	54.7	11.2	7.5	0.00
7	3	1.0180	-5.200	0.0	0.0	0.00	0.0	0.00
8	2	1.0400	0.500	60.0	16.1	0.00	0.0	0.00
9	3	1.0040	-9.100	0.0	0.0	40.0	25.0	19.0
10	3	0.9870	-10.50	0.0	0.0	40.0	15.0	10.0
11	3	0.9890	-9.400	0.0	0.0	23.5	11.8	0.00
12	3	0.9890	-8.500	0.0	0.0	26.1	11.6	0.00
13	3	1.0060	-8.000	0.0	0.0	13.5	5.8	0.00
14	3	0.9930	-9.900	0.0	0.0	14.9	5.0	0.00

표 1(b) 발전력 상하한치

모션	P _{Gmax} [MW]	P _{Gmin} [MW]	Q _{Gmax} [Mvar]	Q _{Gmin} [Mvar]
1	90.0	0.0000	100.0	-20.0
2	80.0	0.0000	60.0	-10.0
3	90.0	0.0000	70.0	-10.0
6	100.0	0.0000	80.0	-10.0
8	80.0	0.0000	40.0	-10.0

표 1(c) 선로데이터

선로	From	To	R	X	Tap	YC
1	1	2	0.0194	0.0592	0000	0.0528
2	2	3	0.0470	0.1980	0000	0.0438
3	2	4	0.0581	0.1763	0000	0.0374
4	1	5	0.0540	0.2230	0000	0.0492
5	2	5	0.0570	0.1739	0000	0.0340
6	3	4	0.0670	0.1710	0000	0.0346
7	4	5	0.0134	0.0421	0000	0.0128
8	5	6	0.0000	0.2520	1.0000	0.0000
9	4	7	0.0000	0.2091	0.9750	0.0000
10	7	8	0.0000	0.1762	1.0000	0.0000
11	4	9	0.0000	0.5562	0.9625	0.0000
12	7	9	0.0000	0.1100	1.0000	0.0000
13	9	10	0.0319	0.0845	0000	0.0000
14	6	11	0.0950	0.1989	0000	0.0000
15	6	12	0.1229	0.2558	0000	0.0000
16	6	13	0.0662	0.1303	0000	0.0000
17	9	14	0.1271	0.2704	0000	0.0000
18	10	11	0.0820	0.1921	0000	0.0000
19	12	13	0.2209	0.1999	0000	0.0000
20	13	14	0.1709	0.3480	0000	0.0000

표 1(d) 유도전동기 데이터

모선번호	유도기 [%]	슬립	시정수 [sec]	역률	모선번호	유도기 [%]	슬립	시정수 [sec]	역률
2	70	0.02	1.0	0.90	10	70	0.02	1.0	0.95
3	90	0.05	0.5	0.90	11	70	0.02	1.0	0.95
4	70	0.05	1.0	0.95	12	70	0.02	1.0	0.95
5	70	0.02	1.0	0.90	13	70	0.02	1.0	0.90
6	70	0.02	1.0	0.90	14	80	0.04	1.0	0.90
9	80	0.02	0.5	0.90					

표 1(e) OLTC 데이터

모선번호	시정수 [sec]	상한값 [pu]	하한값 [pu]	기준 전압
4	0.10	1.1	0.9	1.0
10	0.10	1.1	0.9	1.0
11	0.10	1.1	0.9	1.0

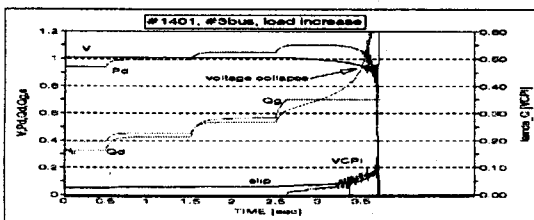
표 1(f) SVC 데이터

모선번호	시정수 [sec]	상한값 [pu]	하한값 [pu]	기준 전압
4	0.05	1.0	0.0	1.0
9	0.05	0.5	0.0	1.0
10	0.05	0.5	0.0	1.0

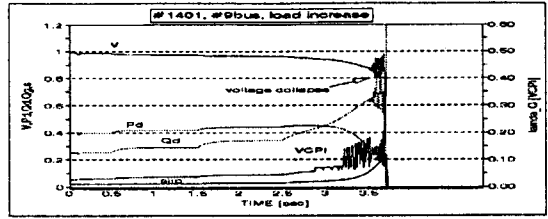
2.3.2 해석결과

본 사례연구에서는 외란 및 제어계의 동작에 따른 동적전압안정성을 모의하였다. 계통외란에 의해 전압불안정이 초래되는 경우 SVC, OLTC 등을 투입함으로써 전압안정도를 제어할 수 있는지 여부를 검토하였다. 모의조건으로는 기본외란으로서 계통 각 모선의 부하가 매 단계당 5[%]씩 균등히 증가하는 것으로 하며, 관측모선으로는 ③, ⑨, ⑩모선을 선택하였다.

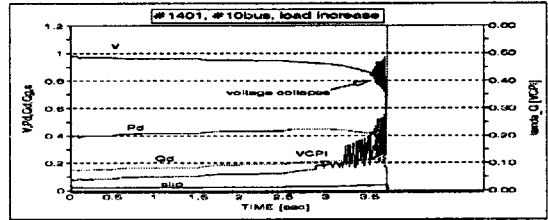
가. 단순부하증가시



(a) ③ 모선



(b) ⑨ 모선



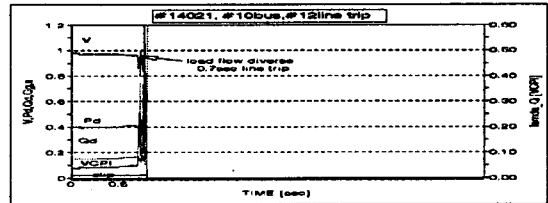
(c) ⑩ 모선

그림 3 모선부하 증가시 전압붕괴특성

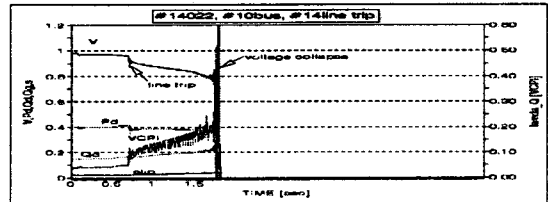
표 2. 모선부하 증가시 전압붕괴특성 요약

외란종류	전압붕괴 전진과정			최대VCPi 및 최저전압	주붕괴원인
	붕괴부하수준	발전기무효한계도달순서	붕괴현상 및 전진속도		
부하증가 5%/step	1.20배	②③⑥⑧	⑧발전기 한계도달 시 발산	#10모선 0.25/0.86	⑩모선 유도기 무효전력급증 유도기점유율90% 시정수 0.5sec

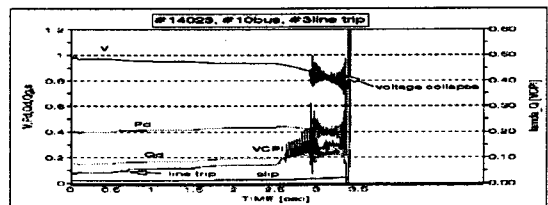
나. 부하증가시 선로가 탈락한 경우



(a) #12 선로 탈락시 (⑩ 모선)



(b) #14선로 탈락시 (⑩ 모선)



(c) #3 선로 탈락시 (⑩ 모선)

그림 4 선로탈락시 전압붕괴특성

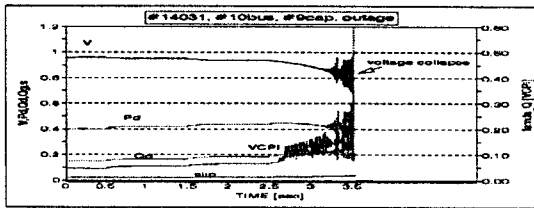
표 3. 선로탈락시 전압응동 분석

외란종류 선로탈락 부하증가 5% /step	전압붕괴 전진과정			최대VC PI 및 최저전압	주붕괴원인
	붕괴부 하수준	발전기무 효한계도 달순서	붕괴현상 및 진전속도		
#12 open (63+j14)	1.05배	⑥	⑥발전기 한계도달 즉시발산 (0.2초)	#10모선 0.25/0.91	부하지역 공급 양 계 통전원중 1축 선로 차단, 전원-부하 전 기적순설비를 증가
#14 open (33+j12)	1.10배	②③	②한계도 달,모선 전압저하 (1.1초)	#10모선 0.18/0.79	1. ⑨모선 유도기 슬 립증가로 인한 무효 전력 증가 시정수 0.5초, 유도기 비율 80%
#3 open (35+j9)	1.15배	③⑥⑧②	②한계도 달,전진 적전압저 하(0.8초)	#10모선 0.22/0.83	2. #3 선로탈락시 전 기적 거리증가가 #14 보다 적음.

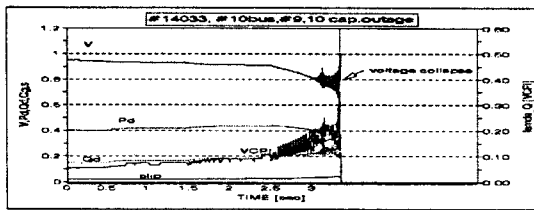
다. 조상설비 정지

표 4. 조상설비 정지시 전압응동특성

외란종류 조상설비 정지 부하증가 5% /step	전압붕괴 전진과정			최대VC PI 및 최저전압	주붕괴원인
	붕괴부 하수준	발전기무 효한계도 달순서	붕괴현상 및 진전속도		
⑨콘덴서 운휴 (j19)	1.15배	⑥③③	③발전기 한계도달 점진적발 산(0.7초)	#10모선 0.21/0.86	③⑨모선의 낮은시정 수 유도전동기 무효 전력 급증 및 발전기 무효출력한계도달
⑩콘덴서 운휴 (j29)	1.15배	⑥⑥③	②한계도 달,빠른 전압저하 (0.5초)	#10모선 0.3/0.82	1. ⑨ 커패시터 탈락 및 ⑥발전기 예비력 부족(0.1)으로 지역 무효전력수급 불안정



a) ⑨ 모선 커패시터 정지시



b) ⑨, ⑩ 모선 커패시터 정지시
그림 5 조상설비 정지시 전압붕괴특성

라. 발전기 탈락

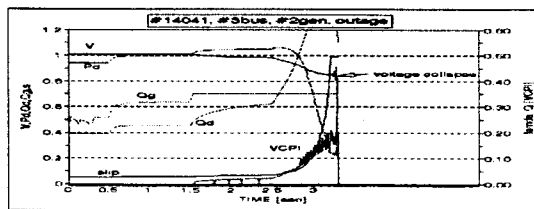


그림 6. #2 발전기 탈락시 ③ 모선 전압특성

표 5. 발전기 탈락시 전압응동특성

외란종류 발전기 탈락 부하증가 5% /step	전압붕괴 전진과정			최대VC PI 및 최저전압	주붕괴원인
	붕괴부 하수준	발전기무 효한계도 달순서	붕괴현상 및 진전속도		
②발전기 운휴 (60+j34)	1.15 배	③⑥⑧	③vcpi급 증,모터 stall	#10모선 0.18/0.89 ③모선 0.16/0.86	②발전기 운휴로 인 한 무효예비력부족 도 ③발전기무효한계 달과 빠른 시정수의 모터부하로 인한 무 효전력수급증
③발전기 운휴 (70+j35)	1.05 배	②⑧⑥	⑥빠른 무효한계 도달,③ 모터stall (1초)	#10모선 0.17/0.90	③발전기 운휴로 인 한 무효예비력 부족 빠른시정수의 모터부 하로 인한 무효전력 급증
⑥발전기 운휴 (80+j54)	1.05 배	②③⑧	계통전반 적 일시 적 무효 한계도달 초(0.5 초)	#10모선 0.19/0.87	부하지역전원 탈락으 로 초기 전압 저하 (V/VCPi : 0.9/0.09) 무효예비력 부족
⑧발전기 운휴 (60+j16)	1.10 배	②③⑥ ②는 초 기부터 한계치	수정 제어 가능한 전압에서 일시 붕괴	#10모선 0.22/0.92	부하지역전원탈락 ⑥발전기 무효예비력 이 상대적으로 (0.27)으로 붕괴지연

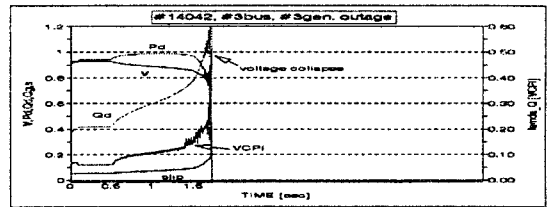


그림 7. #3발전기 탈락시 ③모선 전압특성

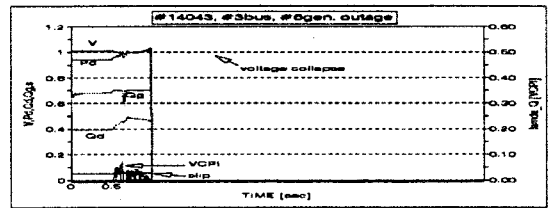


그림 8. #6발전기 탈락시 ③모선 전압특성

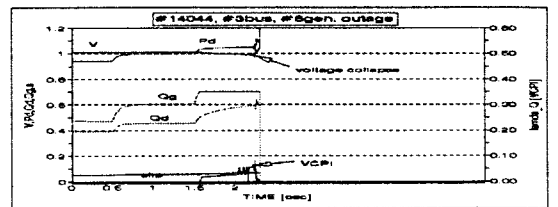


그림 9. #8발전기 탈락시 ③모선 전압특성

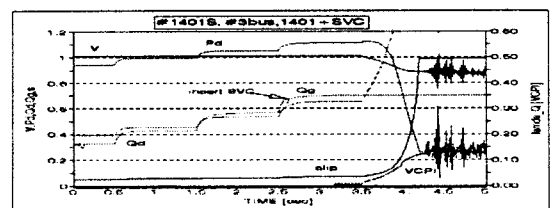


그림 10. SVC전압보상시 ③모선 특성

마. SVC 보상시

SVC의 보상이 전압안정도 개선에 미치는 효과를 모의하고자 VCPI가 크고 부하중심지인 ⑩,⑨,④모선에 각각 50,50,100MVA를 투입하고 그 효과를 측정하였다. 결과는 표 6과 같다.

표 6. SVC 보상에 의한 전압안정도 개선효과

외란종류	전압붕괴 전진과정		최대VCPI 및 최저전압	개선효과
	붕괴부하수준	붕괴현상 및 전진속도		
자연부하 증가 SVC보상 후(j200) 개선효과	1.15/ 1.20배	모터 슬립증가에 의한 점진적 붕괴	1.15배부하 #10모선 0.25/0.86 ↓ 0.05/1.02	1. ③모터 stall 방지(1.15배 부하시) 2. ③⑨모선모터 stall 무효전력을 SVC에서 공급하므로 전체과급 방지 및 긴급제어를 위한 시간확보

바. OLTC 운전효과

OLTC 운전이 동적전압안정도에 주는 영향을 모의하였다. 모의조건은 BASE CASE의 1.15배 부하에서 ④, ⑩, ⑪모선에 투입하는 것으로 하였다. ⑩모선에서 관측한 결과 OLTC의 투입에 의하여 모선부하전력은 증가하고 이에 따른 전압붕괴는 가속화됨을 볼 수 있었다

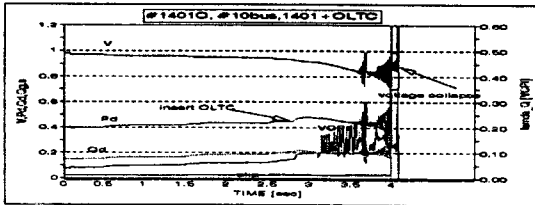


그림 11. OLTC 운전이 전압안정도에 주는 영향

사. 발전기 탈락시 SVC보상에 의한 전압안정화

본 CASE는 발전기 탈락시 전압이 붕괴되는 경우 SVC에 의해 전압붕괴의 제어가 가능함을 보여준다. 앞의 CASE #14041에 동동시정수가 0.05초인 SVC를 VCPI가 큰 순서대로 ⑩(0.12), ⑨(0.10), ④(0.06)모선에 각각 50[Mvar], 50[Mvar], 100[Mvar]를 투입, 운전한 결과 부하전력을 1.2배로 증가하여도 전압붕괴가 발생하지 않았다. 각 모선의 전압도 0.9[pu]이상을 유지하였으며, 1.2배의 부하전력에서 최대VCPI도 0.22로되어 전압붕괴시 긴급제어를 사용할 수 있는 여유를 주는데 매우 유효함을 알 수 있다.

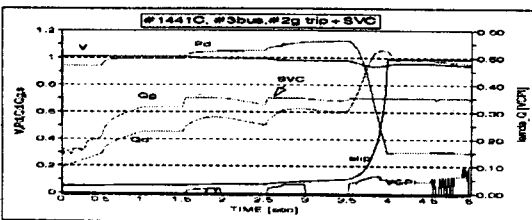


그림 12. 발전기 탈락시 SVC 보상효과 ③모선

표 7. SVC에 의한 전압안정화 효과

외란종류	전압붕괴 전진과정		최대VCPI 및 최저전압	개선효과
	붕괴부하수준	붕괴현상 및 전진속도		
②발전기 탈락시 SVC보상 후(j200) 개선효과	1.15/ 1.20배	1. ③모터 stall 하나 ⑨모터는 stall안함 2. 국부적 붕괴가 전체 붕괴로 전진되는 시간 지연	1.15배부하 #10모선 0.25/0.86 ↓ 0.05/1.02	1. ③모터 stall 방지(1.15배 부하시) - 보상전 ③⑥⑨발전기 무효한계 도달(1.15배) - 보상후 모터stall에도 계통전압 안전유지 2. 일시적 stall무효전력을 SVC에서 공급하므로 전체과급 방지 및 긴급제어를 위한 시간확보

3. 결론

동적 전압안정도 해석프로그램에 의하여 전력계통에서 발생가능한 다양한 외란에 대하여 전압안정도에 영향을 주는 전압, 무효전력등의 파라메타의 응답을 검토하고 전압안정도 제어를 위한 제어기의 역할을 분석해 보았다. 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 관성정수가 낮은 유도전동기 부하의 비율이 높을수록 외란에 의한 무효전력의 수급불안정이 크며, 따라서 전압붕괴로 이어질 가능성이 높다.
2. 외란에 대하여 응답할 수 있는 무효예비력이 부족한 경우, 예컨대 지역부하를 담당하는 발전기가 정지상태에 있는 경우는 사소한 외란에도 전압저하를 일으키고 전압붕괴로 이어질 수 있다.
3. 부하지역을 공급하는 중요송전선로가 탈락하면 부하-전원간의 전기적 손실증가비율 및 해당부하의 전압특성에 따라 전압붕괴의 양상이 달라진다.
4. 빠른 응답특성을 가진 적정용량의 SVC를 설치하면 전압붕괴를 방지 또는 지연시키는데 유효하며, 과도용량이 큰 SVC를 잘 활용하면 비상제어에 필요한 시간을 얻을 수 있다.
5. 계통의 전압붕괴 근접도지표로서 최대무효전력 손실감도($\partial Q_{loss} / \partial PL$)를 사용하면 전압불안정 상황을 예측할 수 있으며, 전압붕괴 방지를 위한 안전성 제어가 가능하다.

[참고 문헌]

[1] 이근준, 김용배, 김건중 “계통안전성 제어를 고려한 동적전압안정도에 관한 연구”, 대한전기학회 논문집 44-9-3, pp.1133-1140, 1995. 9
 [2] Carson N. Taylor, "Power System Voltage Stability", EPRI, McGraw-Hill, 1994
 [3] “계통안전성제어를 고려한 동적전압안정도 연구 사후관리”, 전력연구원 1995. 12