

동적전압안정도를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어

문 경섭, 박 영언, 이 송근, 박 종근, 손 광명
 서울대학교 전기공학부 동경대학교 전기공학과

Coordinated Control of SVC and ULTC Considering Dynamic Voltage Stability

Kyeong S. Moon, Young O. Park, Song K. Lee, Jong K. Park, Kwang M. Son
 Seoul National University Donggeui University

(Abstract)

The implementation of Static Var Compensator(SVC) provides opportunites to maintain voltage profile and improve voltage stability in large scale power system. Under Load Tap Changing(ULTC) transformer has been used to control the voltage. It is necessary that Coordinated control of SVC and ULTC for the better performance. This paper shows that the characteristic of Voltage control using SVC or ULTC and the condition of the coordinated control considering dynamic voltage stability.

영향이 클 수 있다. 이중 ULTC는 적절히 제어되지 않을 경우 오히려 전압 안정도에 악영향을 줄 수 있다. 또한, SVC 및 동적 부하와의 상호 작용은 전력계통의 안전 운전에도 중요한 문제가 된다.

SVC와 ULTC의 제어협조에 관한 연구로는 전압유지특성과 탭동작회수를 최적화하는 협조제어에 관한 연구[1]가 있었으며, 본 논문에서는 SVC, ULTC 등의 상호작용의 특성을 파악하여 이들을 통합된 환경에서 협조하게 함으로써 각기들의 특성을 최대한 살리는 동시에 동적 전압 안정성을 포함한 전력계통의 안정운전을 극대화하기 위하여 제어제가 고려해야할 특성을 살펴보았다.

1. 서 론

전력계통은 거대화하고 있으며 전력수요는 점점 증대하고 있다. 전력회사는 증대하는 전력 수요에 대처하기 위하여 발전 설비 및 송 배전 설비의 신규 건설을 추진하고 있지만 심각한 용지 확보 문제에 직면하고 있다. 이로 인해 수요기 부근에 발전 설비를 건설하지 못함으로 인하여 발전소와 수요지간의 송전선로의 장거리 화를 야기하고, 이는 곧 전력 계통 안정도 여유의 감소를 초래하여, 예기치 못한 사고 발생시 계통 전체가 심각한 안전성에 위협을 받게 된다.

이러한 문제를 효과적이고도 경제적으로 해결하기 위하여 기존의 계통을 연계 운용하고 설비의 이용률을 극대화하고 안정도 여유를 확보함으로써 신규 송전 선로의 건설 없이 송전 용량을 증대시키는 방안으로서 최근 눈부시게 발전한 대 전력 반도체 소자 기술을 전력 계통에 적용하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다. 이것은 기존의 교류 계통에 유연성을 부여하려는 Flexible AC Transmission Systems (FACTS)의 개념에 포함된다.

FACTS로 분류되는 여러 기기중 기존의 무효 전력 보상이기 가지고 있는 비속응성과 불연속성 문제를 해결해줄 수 있는 정지형 무효 전력 보상기 (Static Var Compensator, SVC)는 그 효과가 현장에서 널리 검증되어 실용화 단계에 와 있으며, 국내에서도 이를 채택하여 현재 서대구에 이를 설치할 계획에 있다.

SVC는 그 목적상 주로 부하측 모선에 설치되어 운전되며 지며 모선의 전압을 제어하는 것에 1차적인 목적이 있다. 따라서 발전기 모선과는 전기적 및 거리적으로 비교적 원거리에 위치하게 되어 SVC에 의한 동적인 특성은 발전기측 기기들과의 상호 작용보다는 부하측의 여러 기기들과의 상호 작용에 의해 지배되는 경향이 있다는 것과 SVC의 설치 목적이 주로 부하측의 전압 제어에 있다는 것은 SVC 제어기 설계시 기존의 발전기측 제어 장치의 설계 방식과는 달리 부하측에 설치되어 부하측의 동특성에 큰 영향을 미치는 제어기와외 상호 작용 및 부하의 동특성을 고려해야 한다는 결론에 도달할 수 있다.

부하측에는 전압 제어를 위한 부하시 탭 절환기(Under Load Tap Changer, ULTC)가 부착되어 있으며 기존에 설치되어 있는 커패시터 뱅크도 포함되어 있을 수 있다. 그리고 동적 전압 안정도에 심각한 영향을 미칠 수 있는 동적 부하의

2. SVC의 제어특성 및 전압안정도

SVC는 선로에 병렬연결되어 무효전력을 발생·흡수함으로써 전압 또는 기타 다른 전력계통의 정수를 유지 또는 제어하는 기기이다. 기본적으로는 설치 지점의 전압을 일정하게 유지하는 기능을 가지고 있으나, 부가제어기의 다양한 제어를 통하여 다음과 같은 전력계통의 여러 가지 문제점을 해결할 수 있다.[2]

- 송전용량 증대
- 과도안정도 여유도 증대
- 전력진동(Power Oscillation)의 억제
- 과도 과전압현상의 감소
- 저주파 진동의 감쇠
- 상간부하의 불균형 개선
- AC-DC 변환기의 무효전력공급

2.1 SVC의 제어구조와 특성

SVC는 다양한 구성을 가지고 있으나, 일반적으로 고정 커패시터스(FC)와 사이리스터제어 인덕터스(SCR)가 병렬로 연결된 구조를 가지고 있으며, SVC의 모션전압을 측정하여 기준전압과의 차이에 따른 보상전류(I_{SVC})가 흐르도록 SVC의 리액턴스값을 제어함으로써 SVC 모선의 전압을 일정하게 유지하도록 하는 것을 기본적인 제어구조로 하고 목적에 따른 부가제어를 할 수 있다.(그림1 참조)

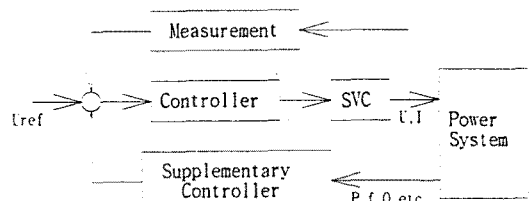


그림1 SVC 제어 구조

정상상태에서의 SVC의 기본적인 제어특성은 그림2와 같다. 즉, SVC 모션전압 U는 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$U = U_{ref} + X_{sL}I_{SVC} \quad (1)$$

U_{ref} : SVC의 제어 기준전압
 X_{SL} : 제어계의 이득 ($-\frac{\Delta U}{\Delta I_{SVC}}$)
 I_{SVC} : SVC 보상전류

그리고, SVC의 보상전류에 의한 전력계통의 전압강하는

$$U = E - X_e I_{SVC} \quad (2)$$

E : 전력계통의 등가기전력
 X_e : 전력계통의 등가임피던스

가 되므로, U_{ref} 를 E 와 같게하고, 제어계의 이득 X_{SL} 을 계통의 등가 임피던스와 같게하면 SVC 모션전압을 일정하게 유지할 수 있다.[2]

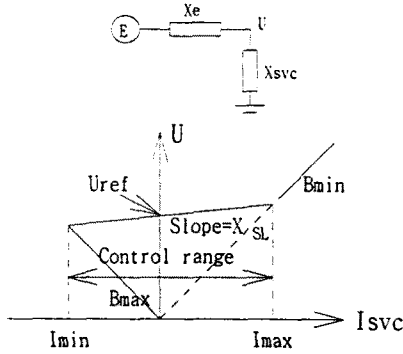


그림2 SVC의 제어특성

2.2 SVC와 동적전압안정도

수요의 변화에 따른 전압안정도의 변화를 살펴보기 위하여 PV곡선을 살펴보기로 하자. 그림3에서 알 수 있듯이 부하가 증가하여 전압의 운전점이 불안정 영역으로 들어가는 것을 전력용 콘덴서를 투입하면 안정영역에서 계속 운전할 수 있다. 그러나, 전력용 콘덴서의 투입속도가 수요증가에 미치지 못 할 경우나 대응량의 전력용 콘덴서를 일시에 투입하는 경우 투입후에도 운전점이 계속하여 불안정영역에 있게되어 전압불안정화가 일어나게 된다. 또한 수요증가에 대응하여 전력용 콘덴서의 투입을 증가시키면 운용전압이 한계전압에 근접하게 되고, 이 경향이 계속되면 콘덴서를 투입하더라도 전압이 낮은 영역에 있게 된다. 따라서 전력용 콘덴서에 의한 전압유지에는 한계가 있다.

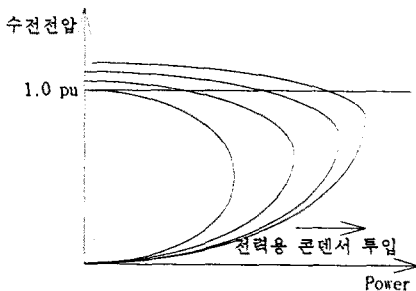


그림3 전력용 콘덴서의 투입에 따른 PV 곡선의 변화

그림4는 SVC설치가 PV곡선에 미치는 영향을 보여주고 있다. SVC가 제어범위내에서는 일정 전압을 유지하다가, 제어 범위를 벗어나면 일반 전력용 콘덴서와 같은 특성을 보인다.

따라서, SVC설치로 인한 송전용량의 증가는 같은 용량의 전력용 콘덴서를 투입하는 것과 같다. 그러나, SVC는 빠른 응답속도를 가지고 리액턴스값을 연속적으로 제어함으로써, Capacitor Bank의 투입에 따른 전압변동을 피할 수 있고, Capacitor Bank의 지연투입과 대응량 Capacitor Bank의 투입

시에 발생할 수 있는 동적전압안정도 문제를 피할 수 있는 장점을 가지고 있다.

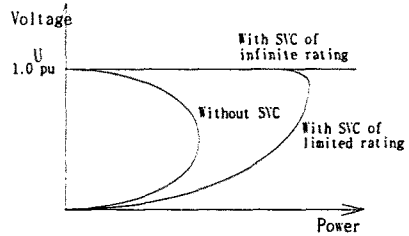


그림4 SVC 설치시 PV 곡선의 변화

3. ULTC의 제어특성

그림5는 ULTC 변압기의 제어시스템 구조를 보여주고 있다.[3] ULTC 제어 시스템의 특징은 dead band를 가지는 불연속제어와 순시 전압변동에 빈번한 동작을 방지하기 위하여 time delay설정하는데 있다. 이 time delay에 의하여 ULTC는 완만한 부하의 증감에 대하여 동작하게 된다.

ULTC 변압기에서의 잦은 탭 동작은 ULTC의 고장파 수명 단축의 원인이 되므로, ULTC의 제어는 수전단의 전압의 품질을 만족시키는 범위내에서 최소한으로 동작횟수를 작게 하는 것이 제어의 목표라고 할 수 있다.

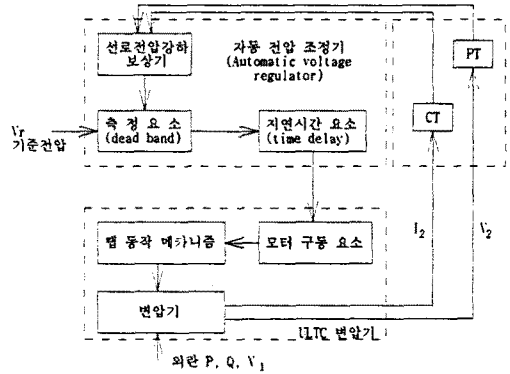


그림5 ULTC의 제어시스템 구조

ULTC의 제어구조는 비교적 간단하나, 비선형성, 불연속성, 시간지연 등으로 그 특성을 표현하는 것은 매우 복잡하다. 식 (3)~(8)은 이러한 특성을 이산시스템식으로 표현하였다.[3]

$$n(t+1) = n(t) + d \cdot f(e(t), \tau(t)) \quad (3)$$

$$\tau(t+1) = g(e(k), \tau(k)) \quad (4)$$

$$f(e, \tau) = \begin{cases} 1 & \text{if } e > \epsilon \text{ and } \tau > T \\ -1 & \text{if } e < \epsilon \text{ and } \tau < T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$g(e, \tau) = \begin{cases} \tau + 1 & \text{if } e > \epsilon \text{ and } \tau > T \\ \tau - 1 & \text{if } e < \epsilon \text{ and } \tau < T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta v = \frac{\delta v}{\delta n} \Delta n \quad (7)$$

$$e(t+1) = e(t) + \Delta v \quad (8)$$

$e = v - v_r$: 전압 편차 n : 탭 위치
 v : 제어전압 v_r : 기준전압
 ϵ : 불감대 d : 탭의 크기
 τ : 카운터 T : 지연시간

위와 같은 식을 이용하여 동적전압안정도를 해석하는 것은 매우 어려운 일이 될 것이다. 그러나, 그림6과 같은 단위동가 회로 단선도를 이용하고 식(9)와 같이 연속시스템 모델을 채택하면[4], 탭비의 변화에 따른 계통특성의 변화를 살펴볼 수

있다.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{T} (V_0 - V_2) \quad (9)$$

n : 탭비 (권선비/공칭권선비)
 T : Time delay
 V₀ : 2차 기준전압
 V₂ : 2차 측정전압

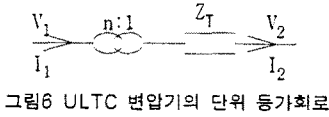


그림6 ULTC 변압기의 단위 등가회로

4. SVC와 ULTC의 협조제어

4.1 SVC와 ULTC의 제어 협조의 필요성

SVC와 ULTC의 상호 협조 문제를 고려하지 않을 경우, 부하의 불규칙한 변동으로 ULTC의 불필요한 동작이 증가해 기기 수명의 단축을 가져올 수 있으며, 속응성을 가지는 SVC가 포화된 채로 운전될 경우 긴급시의 사고 대처 능력이 급격히 떨어진다. 또한 순간적인 동적 부하 변동에 따른 동적 전압 안정도 위기 발생시 이를 적절히 억제하기 위해서는 각 기기의 협조가 필수적이다.

그런데 각 기기들의 협조를 변전소 운전자의 상황 판단에 의존하게 될 경우 급변하는 계통 상태에 신속히 대응하기에는 어려움이 크다. 따라서 이들은 자동화된 제어기에 통합되어야만 그 효과의 진정한 극대화를 이룩할 수 있다.

4.2 SVC와 ULTC의 협조제어

SVC는 변전소의 고압측과 저압측에 모두 설치할 수 있으나, 경제적인 이유 등에서 주로 저압측 모선에 설치되어 있다.(그림7 참조) 이 경우, SVC는 변압기 1차측 고압모선의 전압을 일정하게 유지하는 기능을 하고, ULTC는 부하전류의 증가에 따른 부하선로의 전압강하를 보상하도록 저압모선의 전류를 제어하는 기능을 담당하는 것이 기본적인 제어이다.

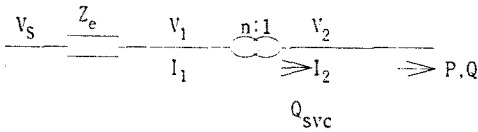


그림7 SVC와 ULTC의 등가회로

그러나, SVC는 뛰어난 속응성을 가지고 전압을 제어하는 능력을 가지고 있으므로, 무가적인 제어로 ULTC가 담당하고 있는 저압측 모선전압 제어의 일부 담당할 수 있다. 이 경우 ULTC의 불필요한 탭 동작을 줄일 수 있어 기기의 수명 연장하고 사고발생의 위험률을 감소시킬 수 있으며, ULTC의 불연속 제어에 따른 전압변동을 억제시켜 전압의 질을 향상시키는 효과도 온다.[1]

식(10)은 변압기 2차 전압과 탭비, SVC 보상전류의 관계를 간략하게 표시하고 있다. 이 식에서, 부하증가시 ULTC의 탭을 동작시키지않고 Isvc를 음으로 증가시키면 2차 전압을 제어할 수 있음을 알 수 있으므로, ULTC의 탭 동작에 앞서 SVC로 전압을 제어하고 전압상승이 지속되면 ULTC를 동작 시킴으로서 전압제어와 ULTC 탭 동작의 감소를 동시에 만족시킬 수 있다. 이 경우, SVC의 리액턴스 값이 제어한계에 가까이 접근하여 운전될 확률이 높아져 순간적인 동적부하의 변동에 따른 동적전압안정도 위기 발생시 이를 억제하는 능력이 떨어지게 된다.

$$V_2 \approx \frac{1}{n} V_S - X_e(I_{SVC} + I_{Load}) \quad (10)$$

또한, 일반적으로 탭 동작직후의 부하는 정전류 특성이 있

으므로 전력이 탭비(n)에 반비례한다. 따라서, 두 기기가 독립적으로 제어되고 있을 때 SVC의 동작점이 제어한계 가까이에서 운전되고 있을 때 갑작스럽게 탭이 동작하면 SVC의 운전점이 제어한계를 벗어나 전압불안정화 현상이 초래될 수 있다.

따라서, ULTC와 SVC가 상호 밀접하게 연관되어 있는 환경하에서 이들의 협조 운전을 위해서는 제어특성에 기초한 각 기기의 역할이 구분되고, 각 기기들이 통합적으로 제어되는 구조를 가지는 것이 필요하다. 이것을 위하여 과거의 고전적인 제어기들이 가지고 있는 상호 간섭 현상을 다변수제어(Multivariable Control) 문제로 접근하여 각 기기 및 계통의 상태를 정확히 파악하고, 전압유지, ULTC 탭 동작횟수의 최소화, 동적전압안정도 능력을 동시에 고려할 수 있는 제어기를 선정하여, 전압안정도에 여유가 있으면 ULTC 제어의 상당부분을 SVC가 담당하고, 여유가 적은 경우에는 SVC와 ULTC를 전압안정도를 유지하는 방향으로 제어함으로써, 전압품질과 동적전압안정도를 확보하면서 기기의 성능 및 수명을 극대화할 수 있다.

5. 결 론

SVC는 주로 부하측 모선에 설치되어 운전되어지며, 부하와 부하측 전압제어를 위한 ULTC, 전력용 콘덴서 뱅크와 상호 작용에 의하여 모선의 전압을 제어하므로 이들의 상호작용과 동특성을 고려하는 것이 필요하다.

ULTC와 SVC는 다같이 모선전압을 제어하는데, SVC는 전압안정도 향상을 위한 모선전압의 유지에 목적이 있고, ULTC는 부하증가에 따른 부하선로의 전압강하를 보상하는데 목적이 있다. 이 두기기는 서로 협조제어 함으로써 각각의 제어목적을 달성할 수 있을은 물론 기기의 수명을 연장하고 고장을 방지할 수 있었다. 그리고, 이 경우 SVC의 동적전압안정도 유지능력에 유의하여야 함을 알 수 있었다. 이를 위하여는 정확한 협조제어의 효과와 동적전압안정도의 해석이 필요하므로, 향후 각 기기와 전력계통, 부하의 상호작용과 동특성을 모델링하고, 전체를 다변수 제어시스템의 문제로 해석하여 전압안정도를 고려한 통합된 제어기를 연구가 하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. J. Paserba, D. J. Leonard, N. W. Müller, S. T. Naumann, M. G. Lauby, F. P. Sener, "Coordination of a Distribution Level Continuously Controlled Compensation With Existing Substation Equipment For Long Term VAR Management", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 7, pp 1034-1040, 1994. 4
- [2] CIGRE Working Group 38-01; Task Force No. 2 on Static Var Compensators. "Static Var Compensators", 1986
- [3] 김홍균, "다중부하시 탭 절환기의 협조제어", 서울대학교 전기공학부 석사학위 논문, 1997
- [4] S. Abe, Y. Fukunage, B. Kondo, "Power System Voltage Stability", IEEE Trans. on Power App. Syst., Vol 101, pp 3830-3840, 1982. 10
- [5] D. Karisson, D. J. Hill, "Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Load in Dynamic Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 9, pp 157-166