

순차 프리에 변환(DFT)를 이용한 전압비교형 TCSC TCSC(Thyristor Controlled Series Compensation)

고성규* 박상영 박종근
서울대학교 전기공학과

Voltage Comparison-type TCSC Using Recursive Discrete Fourier Transform

S.K.Ko* S.Y.Park J.K.Park
Dept. of Electrical Eng, S.N.U

ABSTRACT

We have proposed a new technology compensating reactance component of line and load. Because capacity of SC is static, it is not appropriate to varying reactance and causes SSR problems, TCSC is introduced for the flexible control of reactance of SC. If SC voltage is varied when the capacitor current is constant, it can be considered that capacity of SC was varied. So capacity of SC can be controlled by controlling the voltage of SC. Control reference voltage of SC can be obtained from the condition that sum of reactive powers in all parts is zero.

1. 서론

산업발전과 생활의 질 향상으로 인해 전력수요는 끊임없이 증가하지만, 환경과 지리적인 제약 때문에 전력전송 설비를 이에 비례해 증대시키는데 어려움이 있다. 새로운 선로를 가설하는데 따르는 어려움 때문에 기존의 전송선로를 효율적으로 이용하여 전력전송 효율을 극대화시키는 방안이 적극 검토되고 있는데, EPRI를 중심으로 제기되고 있는 FACTS(Flexible AC Transmission System)의 개발이 그것이다. 이 방법의 핵심은 사이리스터를 이용하여 선로에 직렬로 연결되어 있는 콘덴서를 제어하는 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation 이하 TCSC) 이다. TCSC를 이용하면 선로의 임피던스를 조절하여 전송선로의 전력 흐름을 원하는대로 제어할 수 있고, 상정사고 시 미리 계산된 임피던스를 갖도록 제어할 수 있으므로 시스템의 안정도를 떨어뜨리지 않고 열적 상한까지 전력을 전송할 수 있다. 전송선로의 리액턴스를 보상하기 위하여 기존에는 직렬 콘덴서를 이용하였으나, 이 경우 연속적으로 리액턴스를 조절할 수 없고 안전성과 속도면에서 사이리스터 제어기에 비해 성능이 떨어진다. 또 선로에 직렬 콘덴서를 부착하는 경우에는 발전기에서 발생하는 저주파 성분과 공진이 생기므로 이에 대한 보완이 필요하다.

본 논문에서는 전체 선로의 역률을 1이 되도록 사이리스터를 제어하고 저주파 공진 현상에서도 역률이 최대로 유지되도록 하였다.

2. 개요

본 논문에서는 전력 전송 효율을 높이는 일반적인 방법으로, 선로와 부하에 나타나는 리액턴스를 보상하는 방안을 제안하고자 한다. 선로에는 주로 유도성 리액턴스 성분이 나타나므로 직렬 콘덴서를 부착하면 선로의 리액턴스를 어느정도 보상할 수 있으나 용량이 고정되어 있으므로 유연성이 떨어진다. 즉 선로 임피던스가 변화할 때는 이에 맞춰 콘덴서의 용량을 조절할 수 있어야 한다.

콘덴서의 전압은 콘덴서의 임피던스와 전류의 곱이므로, 전류를 일정히 유지하고 콘덴서 양단에 나타나는 전압(V_c)을 변화시키면 콘덴서의 용량(C)을 변화시키는 효과를 얻을 수 있다. 즉 콘덴서의 전압을 선로 임피던스의 변화에 맞춰 조정한다. 이때 콘덴서 전압이 변화되는 비율은 제어 기준전압(V_{co})에 선

형적으로 비례하다고 가정한다.

제어 기준전압을 구하기 위해 선로의 총 무효전력이 0이 되도록 하는 조건을 이용한다. 선로 각 부분의 무효전력을 구하기 위해선 전류, 전압의 크기와 위상을 알아야 하는데, 여기서 계산량을 상당히 줄일 수 있는 순차 프리에 변환 (Recursive Discrete Fourier Transform, 이하 DFT) 알고리즘을 이용한다.

이렇게 구한 제어 기준전압과 콘덴서 전압(V_c)을 비교하여 콘덴서 전압이 제어 기준전압을 접근하도록 사이리스터를 on-off 제어 한다.

3. 제어방식의 특징

지금까지 발표된 TCSC 제어방식은 기준 임피던스 방식을 취하고 있다. 선로에 필요한 기준 임피던스를 계산하여 해당하는 임피던스가 되도록 사이리스터의 점화각을 결정하는 것이다. 이를 결정하기 위해서는 점화각에 대한 TCSC의 임피던스 특성식을 계산해야 하는 어려움과 선로전류 측정치로부터 적절한 임피던스를 결정해야 하는 어려움이 있다. 또 콘덴서의 전압에 고조파가 포함되어 있으므로 정확한 위상제어가 힘들다.

본 논문에서는 선로와 부하의 무효전력을 계산하여 무효전력이 0이 되도록 (즉 역률이 최대가 되도록) 기준전압을 결정하므로 제어가 용이하다. 무효전력을 구하는데 필요한 전류와 전압의 위상각은 순차 프리에 변환(DFT)를 이용하여 계산하므로 다른 방식에 비해 계산 속도가 빠르다. 전체적인 제어 특성은 개루프 제어이므로 안정성등에 문제가 적고 구현이 쉽다.

사이리스터를 제어하는데 있어서도 기준전압과 실제 콘덴서의 전압을 비교하여 on-off 제어만 하므로 제어가 용이하다.

다만 기준전압(V_{co})의 선형화 오차가 존재하고 개루프 제어이므로 정상상태 오차가 있다. (실제 시뮬레이션 결과에 의하면 위의 오차는 무시할 수 있을 만큼 작다.)

4. 본론

4.1 TCSC의 모형

먼저 TCSC의 동작원리를 살펴보자. 그림1과 같이 선로에 일정한 전류가 흐른다고 가정하고 가장 간단한 형태의 TCSC를 구성하였다. 이때 사이리스터에 적절한 Gating 신호를 주면 콘덴서의 전압을 V_c 에서 V_c' 로 변화시킬 수 있다. 콘덴서의 전압은 콘덴서 양단의 전류와 콘덴서 리액턴스의 곱으로 나타낼 수 있으므로, 콘덴서 용량 C 가 C' 로 변화된 것으로 해석할 수 있다. 이것을 벡터도로 나타내면 그림2와 같다.

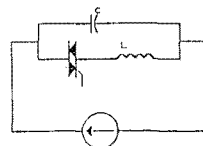


그림1. 간단한 TCSC의 구성

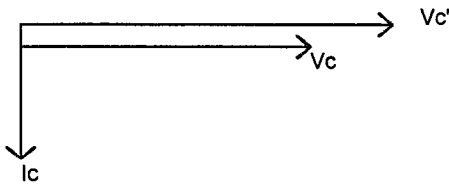


그림2. TCSC의 정상상태에서의 벡터도

4.2 Vc의 선형화

TCSC 양단에 걸리는 전압은 기준전압 V_ω 에 비례하여 증가하므로 $V_c = I_s \frac{1}{j\omega C} + kV_\omega$ (페이저 식)라고 근사시킬 수 있다. (V_c : TCSC 양단에 걸리는 전압, I_s : 선로전류, k : 비례상수) 만약 고조파 성분이 작다면 k 는 $\sqrt{2}$ 로 근사화 될 수 있다.

$V_\omega < 0.8 I_s \frac{1}{j\omega C}$ 의 영역에서 Vernier 제어기에 의한 60Hz 기본파 크기 제어는 오차를 유발 하지만 실용적으로 별 문제가 없는 것으로 분석된다.

다음과 같이 가정하면,
 ①. Vernier 제어기의 회로에는 손실이 없다.
 ②. Vernier 제어기의 L-C 공진회로의 주파수가 60Hz 보다 훨씬 크다. (10배 이상)

$$V_c'(t) \approx V_c(t) + kV_\omega \quad (1)$$

(단, $V_c'(t)$: C의 양단의 전압, $V_c(t) = \frac{I_c(t)}{j\omega C}$, $k = \sqrt{2}$)

위 식에서 C의 손실과 L의 손실에 의한 영향이 크다면, 이것을 고려하여 계수 k 를 조정할 필요가 있다.

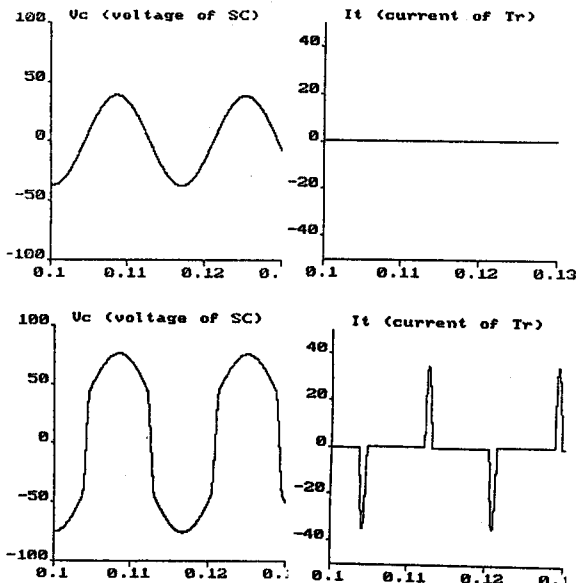


그림 3. TCSC의 전압과 전류의 파형

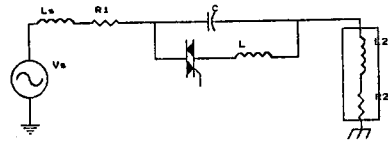


그림4. TCSC를 부착한 전체 회로 모형

4.3. 제어방식

전체 회로에 나타나는 무효전력(선로의 무효전력, 부하측 무효전력)을 보상할 수 있도록 TCSC를 제어한다. 이를 위해 식(1)과 같이 TCSC를 근사화 시키고 전체 무효전력의 합을 영이 되게 하는 싸이리스터 제어 기준전압 V_ω 를 결정한다. (싸이리스터의 제어 기준전압에 따라 TC에 인가되는 전압과 TC의 무효전력의 양을 다르게 결정할 수 있다.)

먼저 각 부분의 무효전력을 보면,
 선로의 무효전력 :

$$Q_n = |I_s|^2 \omega L \quad (2)$$

부하의 무효전력 :

$$Q_L = |V_L| |I_s| \sin \phi \quad (3)$$

TCSC의 무효전력:

$$\begin{aligned} Q_{TCSC} &= \text{Im} [\dot{V}_c I_s] \\ &= \text{Im} \left[\left(\frac{I_s}{j\omega C} + kV_\omega \right) I_s \right] \\ &= - \frac{|I_s|^2}{\omega C} + kV_\omega |I_s| \end{aligned} \quad (4)$$

식(2)-(4)에서 구한 각 부분의 무효전력의 합이 0이 되도록 하는 조건에서 제어 기준전압을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$Q_n + Q_L + Q_{TCSC} = 0 \quad (5)$$

$$V_\omega = \left[|I_s| \omega L - \frac{I_s}{\omega C} + |V_L| \sin \phi \right] / k \quad (6)$$

4.4 순차 푸리에 변환(DFT) 알고리즘

식(6)에서 전류와 전압의 측정치로부터 무효전력을 구하려면 $|I_s|$, $|V_L|$, ϕ 를 알아야 하는데, 여기서는 순차 푸리에 변환(DFT) 알고리즘을 이용하여 계산하였다. 이 알고리즘을 이용하여 고조파 성분을 무시 할 수 있을 만큼 작다고 보고 기본파 성분에 대한 무효전력만 보상하도록 하였다. 기본파에 대해 순차적으로 푸리에 계수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Ireal}[n+1] &= \text{Ireal}[n] - i[n-N] * \cos(2\pi * 60/N) + \\ & i[n] * \cos(2\pi * 60/N) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Iimg}[n+1] &= \text{Iimg}[n] - i[n-N] * \sin(2\pi * 60/N) + \\ & i[n] * \sin(2\pi * 60/N) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vreal}[n+1] &= \text{Vreal}[n] - v[n-N] * \cos(2\pi * 60/N) + \\ & v[n] * \cos(2\pi * 60/N) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vimg}[n+1] &= \text{Vimg}[n] - v[n-N] * \sin(2\pi * 60/N) + \\ & v[n] * \sin(2\pi * 60/N) \end{aligned}$$

$$|I_s| = \sqrt{\text{Ireal}^2 + \text{Iimg}^2}$$

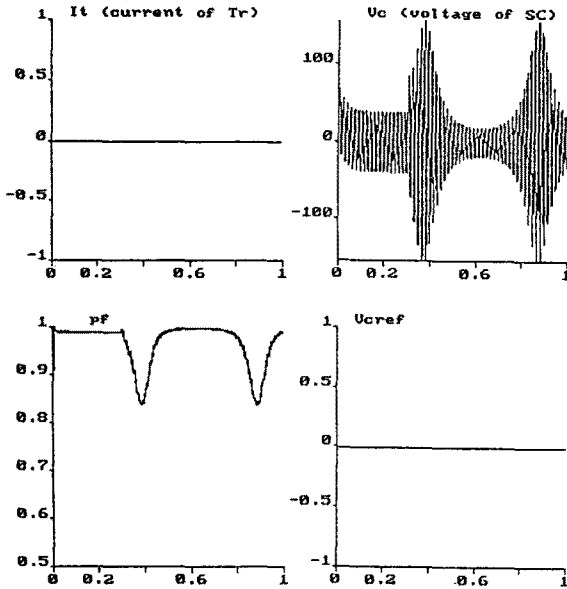
$$|V_L| = \sqrt{\text{Vreal}^2 + \text{Vimg}^2}$$

$$\sin \phi = \sin(\text{Vph} - \text{Iph})$$

위와 같이 전압과 전류의 60Hz 페이저를 실수 성분과 허수 성분으로 순차적으로 구하면 적은 계산량으로 정확한 계산이 가능하다.

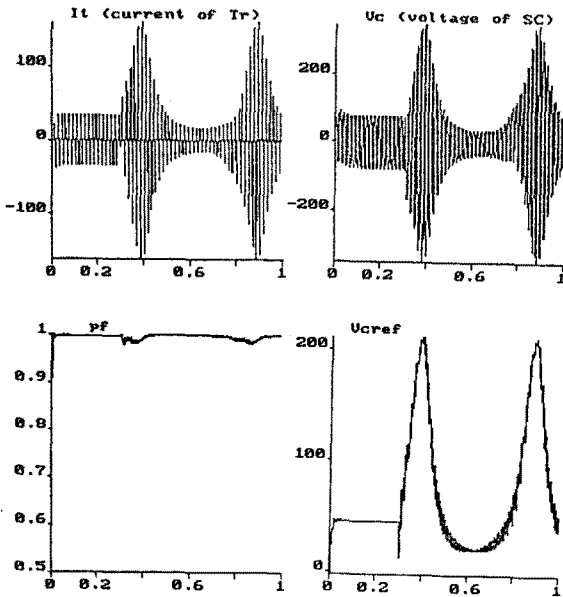
5. 시뮬레이션 결과

부하 역률이 일정 할 때와 변할 때의 역률 보상 정도를 비교하기 위해 결과1에는 제어기를 동작시키지 않았을 때의 콘덴서의 전압과 역률을 나타내었고, 결과2에 TCSC를 제어 했을 때의 역률과 전압을 나타내었다. 부하가 변동할 때의 결과를 비교하기 위해 $t > 0.3$ 에서 부하에 저주파 변동을 가했다.



<결과 1. 비제어시 전체 역률, 기준전압, SC의 전압>

SC(Series Capacitor)를 제어하지 않음(V_{co} 를 0으로 고정).
 $t < 0.3$ 에서는 직렬 콘덴서에 의해 어느정도 보상이 되고 있으나,
 $t > 0.3$ 에서는 SSR에 의해 역률이 크게 흔들리고 있다.



<결과2. 제어시 전체 역률, 기준전압, SC의 전압 >

임피던스 변화에 따라 기준전압 V_{co} 를 계산하여 사이리스터를 제어했을 때 제어하지 않을 경우 보다 역률이 훨씬 향상 됨을 볼 수 있다. (V_c 가 V_{co} 에 따라 변화하고 있고, 역률이 거의 1에서 유지되고 있다)

위 그림에서 보는 바와 같이 직류 옵셋 문제는 기존의 방식 보다 더 잘 해결 된다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

전력 전송 효율을 높이기 위해 선로와 부하의 리액턴스를 보상하는 방법으로 사이리스터 제어 전압 비교형 직렬 콘덴서를 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 부하의 역률이 심하게 흔들릴 때도 사이리스터를 적절히 제어함으로써 안정된 역률을 유지할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 역률 보상에 대해서만 연구 하였지만, TCSC를 제어하여 선로의 리액턴스를 유연하게 조정할 수 있으므로 사고시에 적절한 리액턴스로 발생할 수 있도록 프로그램화 할 수도 있다. 또 실험실 레벨이 아닌 실제 사용용량으로 확대 시켰을때 생기는 문제들도 계속 연구해야 할 사항이다.

※ 참고문헌

- [1] N.Christl, R.Hedin, P.E.Krause, S.M.McKenna, ets, "Advanced Series Compensation (ASC) with Thyristor Controlled Impidance" Joint Session Technology and benefits of Flexible AC Transmission Systems, Sigre, Sep. 1992 SC-14 Paper, Paris,France
- [2] E.Larsen, C.Bowler, B.Damsky, S.Nilsson, "Benefits of Thyristor Controlled Series Compensation" Joint Session Technology and benefits of Flexible AC Transmission Systems, Sigre, Sep. 1992
- [3] E.V.Larsen, K.Clark, C.Wegner, S.Nyati, J.K.Hooker, R.W.Delmerico, D.H.Barker, etc "Thyristor Controlled Series Compensation- control Design and Dynamic Performance" EPRI FACTS Conference Boston, May 1992.
- [4] B.L.Agrawal, R.A.Hedin, R.K.Johnson, A.H.Montoya, B.A.Vossler, "Advanced Series Compensation (ASC) Steady-state, Transient Stability, Subsynchronous Resonance Studies", FACTS EPRI Conference, May, 1992. Boston, MA.