저주파 진동 감쇠를 위한 UPFC의 제어

o김 태현*, 서 장철*, 문 승일*, 박 종근*　　한 병문**
*서울대학교 전기공학부　　**명지대학교 전기공학부

Control of UPFC to Reduce Low Frequency Oscillation

Tae-HyunKim, Jang-CheolSeo, Seung-IlMoon, Jong-KeunPark, Byung-MoonHan
Seoul National University　　MyongJi University

(Abstract)
A control method of UPFC (Unified Power Flow Controller) to reduce low frequency oscillation is proposed. UPFC is modelled by voltage source, which magnitude and phase angle can be controlled. Because there needs some time to change to desired value, d-axis voltage and q-axis voltage is modeled by 1st order delay. LQG(Linear Quadratic Gaussian) is used. It is shown that low frequency can be damped by control of UPFC effectively.

1. 서 론

발전소나 송전 선로를 신설하지 않고 송전 용량을 증가시키기 위하여 유연 송전 시스템 (Flexible AC Tranmission Systems : FACTS) 의 연구가 현재 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 외국의 경우 실용화를 위한 활발한 연구가 진행되고 있으며, 우리 나라의 경우에도 그 기초 연구가 진행 중에 있다.[1]

UPFC는 직렬, 병렬, 위상각 보상의 3가지 역할을 모두 하는 만능인 기기로서 알려져 있다. 다양한 효과가 있으므로, 향후 설치가 예상된다. 그러나, 아직까지는 안정도 향상에 적용된 예는 거의 없으며, 그 전 단계로서 모형 제시가 주로 이루어지고 있다. 그 중, 대표적인 것은 가변 전압원으로 모형화한 것이다 [2][3]. 본 논문에서도 가변 전압원으로 모형화하였으나, UPFC의 동특성이 없다고 본 것[2][3]과는 달리, 동특성을 1차 지연 요소로 모형화하였다. 즉, 기준 전압값으로부터 원하는 값으로의 변화에는 약간의 시간이 필요하므로, 가변 전압원의 d축 전압과 q축 전압을 1차 지연 요소로 모형화하는 것이 필요하다..

저주파 현상에 대한 대책은 주로 여자 제어에 의한 전력 계통 안정기 (Power System Stabilizer:PSS) 였다. 그러나 종래의 lead-lag 보상기는 좁은 범위의 주파수에 대해서만 효과가 있었다. 본 논문에서는 넓은 범위의 주파수에 대해서도 효과가 있는 LQG (Linear Quadratic Gaussian) 제어 기법을 사용했다. LQG 제어 시스템은 모든 상태 변수를 측정할 필요없이 현실적으로 추정 가능한 출력만을 이용하여 시스템의 상태 변수를 추정한 후, 추정된 상태 변수를 이용하여 제어기를 설계하므로 실계통에서의 구현이 용이하다고 판단된다[4].

본 논문에서는 UPFC가 있는 1기 무한대 모선 계통을 대상으로 UPFC를 제어해서 저주파 진동 현상을 억제할 수 있음을 보였다.

2. UPFC

2.1 UPFC의 기본 구조

그림 1은 UPFC의 기본 구성도이다. UPFC는 GTO(Gate Ture Off)를 이용한 2개의 전압원 inverter와 이 두 inverter을 연결하는 직류 capacitor로 구성되어 있다. UPFC는 교류에서 교류로의 전력 변환기이므로, 유효 전력은 2개의 inverter 사이에서 자유롭게 주고 받을 수 있으며, 무효 전력은 각 inverter의 출력 단자에서 독립적으로 흡수 또는 발생할 수 있다.

inverter 2는 UPFC의 주 기능을 수행하며, 제어 가능한 크기와 위상의 60Hz의 교류 가변 전압원을 주입하는 것이다. 생성된 주입 전압은 직렬로 결합된 변압기에 의해 단자 전압과 vector적으로 합해져 출력 전압을 생성한다. 송전 선로 전류가 이 전압원을 통해서 흐르므로, 전압원과 교류 계통과의 유효 전력과 무효 전력의 교환이 이루어지게 된다. 직렬 변압기에서 교환되는 유효 전력은, inverter에 의해서 변환되어서, 양 또는 음으로, 직류 capacitor에 나타나게 된다. 직렬 변압기에서 교환되는 무효 전력은 inverter 내부적으로 발생된다.

선로에 병렬로 연결된 inverter 1의 주 기능은 inverter 2에서 필요한 유효 전력을, 공통으로 연결된 직렬 capacitor를 통해서 공급 또는 흡수하는 것이다. 또한, inverter 1은 inverter 2에서 생성되거나 흡수된 무효 전력과는 독립적으로 유효 전력을 생성하거나 흡수할 수 있다. 직렬 변압기에서 교환되는 유효 전력은 inverter 1과 2에 의해서 선로로 통하는 길이 있지만, 무효 전력은 inverter 2에서 국부적으로 공급되거나 흡수된다. 그러므로, inverter 1은 역률 1로 운전하여 무효 전력 교환을 하지 않을 수도 있고, inverter 2와는 독립적으로 선로와 무효 전력을 교환할 수도 있다. 이 것은 UPFC를 통한 무효 전력 흐름이 불연속적일 수도 있음을 의미한다.

그러므로, 기존 송전 선로 보상 방식인 병렬 보상, 직렬 보상, 위상각 보상의 관점에서 보면 UPFC는 단자 전압 V0에 적당한 크기와 위상의 주입 전압 Vpq를 더함으로서 다중 제어 목적을 수행할 수 있다.

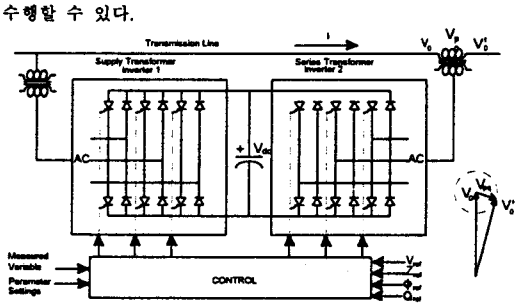

그림 1. UPFC의 기본 구성도

2.2 UPFC의 특징

UPFC는 전력 조류를 제어하는데 대단히 유효하고 만능인 기기이다. 전력 조류를 제어하면서 동시에 송전에 관련된 parameter을 제어하면서, 동시에 송전에 관련된 parameter을 제어하여, 정상 상태에서 효과적인 제어와, 과도와 동적 안정도 개선에 상당한 기능을 한다. 송전에 영향을 미치는 3가지 parameter 즉, 위상각, 전압, 선로 impedance를 종합적으로 제어할 수 있다는 점에서 궁극적인 송전 계통 보상 장치라고 할 수 있다. 예를 들면, 대상 전력 계통의 사고에 보다 효율적으로 대처하기 위해, 계통 보상 방식을 실시간대에서 동적으로 변경할 수 있으며, 보상에 필요한 무효 전력을 내부적으로 공급할 수 있기 때문에 송전 선로의 어떤 지점에도 설치할 수 있다는 장점이 있어, 전력 계통의 운용 개념을 혁신시킬 가능성이 있다.

2.3 정식화

본 논문에서는, UPFC를 크기는 0부터 어떤 값 (본 논문에서는 0.5 p.u.)까지 임의로 제어 가능하고, 위상은 0부터 2까지 임의로 제어 가능한 가변 전압원으로 모형화하였다. 식으로 나타내면,

$$Vpq=Vdpq+jVqpq=V\angle\rho \quad (1)$$
$$0\le V\le Vmax$$
$$0\le\rho<2\pi$$

그림 2는 본 논문에서 사용된 UPFC 모형의 블락 선도를 나타낸다. 이 모형에서 Vdsup와 Vqsup는 UPFC 보조 제어기의 출력 전압 값이다. 기준 값 Vdref와 Vqref는 UPFC의 초기 운전 상태에서의 전압 값이다.

보조 제어기의 출력에 초기기준 값의 신호가 더해진 전압값에 의해서 이 전압 값을 만들어내는 점호각으로 변환된다. 이 과정에서 우리가 원하는 값으로 바로 변화할 수는 없고, 약간의 시간 지연이 발생한다. 본 논문에서는, 이 현상이 d축 전압과 q축 전압에서 독립적으로 발생한다고 보았다. 시간 지연의 속도는 각각 d축 시정수 Td와 q축 시정수 Tq로 표현하였으며, 그 값은 0.1초로 보았다. 이를 식으로 보이면 다음과 같다.

$$\frac{dVdpq}{dt}=\frac{1}{T_d}(-Vdpq+Vdref+Vdsup)$$
$$\frac{dVqpq}{dt}=\frac{1}{T_q}(-Vqpq+Vqref+Vqsup) \quad (2)$$

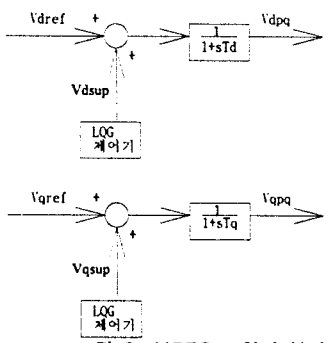

그림 2. UPFC 모형의 블락 선도

선형화하면 다음과 같다.

$$\frac{d\Delta Vdpq}{dt}=\frac{1}{Td}(-\Delta Vdpq+\Delta Vdsup)$$
$$\frac{d\Delta Vqpq}{dt}=\frac{1}{Tq}(-\Delta Vqpq+\Delta Vqsup) \quad (3)$$

3. 전력 시스템 모델

본 논문의 전력 시스템 모델은 다음과 같다.

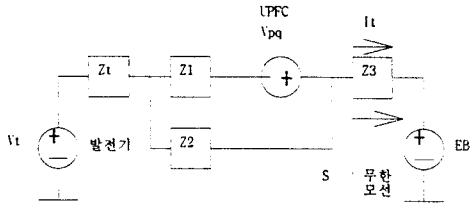

그림 3. 모의 전력 시스템

제어기를 구성하려면 선형화를 하여야 한다. 선형화된 상태 방정식과 출력 방정식은 다음과 같다

$$\frac{dx}{dt}=Ax+Bu$$
$$y=Cx$$

$$x=[\Delta\omega,\ \Delta\delta,\ \Delta id,\ \Delta ifd,\ \Delta i1d,\ \Delta iq,\ \Delta i1q,\ \Delta i2q,\ \Delta v,\ \Delta Vdpq,\ \Delta Vqpq] \quad (4)$$
$$u=[\Delta Vdsup, \Delta Vqsup]$$
$$y=[\Delta P, \Delta Q]$$

본 논문의 상태 변수는 동요 방정식에서 2개, 동기 발전기에서 6개, 여자기에서 1개, UPFC에서 2개 해서 모두 11개이다.

동요 방정식, 발전기, 여자기 등 기존의 식을 이용한 것[5]은 보이지 않았고, UPFC가 들어감으로서 달라진 부분의 수식만 아래에 보였다. 선형화식에서 0가 뒤에 추가된 것은 초기 상태에서의 값을 의미한다.

3.1 단자 전압.

단자 전압은 상태 변수가 아니지만, 수식 전개 과정에서 나타나므로 이를 상태 변수로 나타내어야 상태 방정식을 구성할 수 있으므로 그 식을 아래에 보인다..

Vt, Vpq, EB 의 관계를 구하면

$$Vt=EB+Zth*It-Vth*Vpq$$
$$Z=Zt+Z3$$
$$Zth=Z+(Z1//Z2)=Z+\frac{1}{\frac{1}{Z1}+\frac{1}{Z2}} \quad (5)$$
$$Vth=\frac{1}{\frac{Z1}{Z2}+1}$$

여기서, Zth와 Vth는 발전기 단자와 무한 모선 사이의 Thevenin 등가 impedance와 전압이다.

$$Vt=Vd+jVq$$
$$It=Id+jIq$$
$$Zth=Zr+jZi \quad (6)$$
$$Vth=Vr+jVi$$

이라고 가정하여 실수부와 허수부를 분리하여 보면

$$\begin{bmatrix}Vd\\Vq\end{bmatrix}=Eb\begin{bmatrix}\sin\delta\\\cos\delta\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}Zr&-Zi\\Zi&Zr\end{bmatrix}\begin{bmatrix}Id\\Iq\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}Vr&-Vi\\Vi&Vr\end{bmatrix}\begin{bmatrix}Vdpq\\Vqpq\end{bmatrix} \quad (7)$$

선형화하면

$$\begin{bmatrix}\Delta Vd\\\Delta Vq\end{bmatrix}=Eb\begin{bmatrix}\cos\delta0\\-\sin\delta0\end{bmatrix}\Delta\delta+\begin{bmatrix}Zr&-Zi\\Zi&Zr\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta Id\\\Delta Iq\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}Vr&-Vi\\Vi&Vr\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta Vdpq\\\Delta Vqpq\end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2 수전단의 유효 전력과 무효 전력

제어기의 입력으로서는 측정이 가능한 수전단의 유효 전력과 무효 전력을 이용하였다.

피상 전력은

$$S=P+jQ=EB*It^*=Eb(\sin\delta+j\cos\delta)(Id-jIq) \quad (9)$$

그러므로, 실수부와 허수부를 분리하여 보면 유효 전력과 무효 전력은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix}P\\Q\end{bmatrix}=Eb\begin{bmatrix}\sin\delta&\cos\delta\\\cos\delta&-\sin\delta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}Id\\Iq\end{bmatrix} \quad (10)$$

선형화하면

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\\Delta Q\end{bmatrix}=Eb\begin{bmatrix}\cos\delta0&-\sin\delta0\\-\sin\delta0&-\cos\delta0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}Id0\\Iq0\end{bmatrix}\Delta\delta+Eb\begin{bmatrix}\sin\delta0&\cos\delta0\\\cos\delta0&-\sin\delta0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta Id\\\Delta Iq\end{bmatrix} \quad (11)$$

4. 이산 LQG 제어기

이산 LQG 제어시 설계를 위한 이산 시간 확률 선형 동적 시스템은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$x_{k+1}=Ax_k+Bu_k+w_k$$
$$y_{k+1}=Cx_k+v_k \quad (12)$$

여기서, w_k는 상호 분산 행렬이 W인 process 잡음, v_k는 상호 분산 행렬이 V인 sensor 잡음이고 둘 다 백색 잡음으로 가정한다.

이 경우, 성능 지수는 아래와 같은 통계학적 값으로 설정할 수 있다.

$$J=E\left[\sum_{k=0}^{\infty}(x_k^TQx_k+u_k^TRu_k)\right] \quad (13)$$

식 (13)에서 Q는 양의 반한정(positive semi-definite) 대칭 행렬인 상태 가중 행렬(state weighting matrix)이고, R은 양의 한정(positive definite) 대칭 행렬인 입력 가중 행렬(input weighting matrix)이다. 이 두 가중 행렬 Q와 R은 일종의 설계 변수로 이 값에 의해 제어기의 성능에 많은 영향을 미친다.

본 논문의 경우, 가중 행렬의 값은, 상태 가중 행렬 Q=diag([5000 100 1 1 1 1 1 1 1 1 1])로 입력 가중 행렬 R=diag([100 100])로 선정하였다.

Q의 경우, 전력 계통에서 저주파 진동이나 SSR의 경우 상차각 δ의 진동을 제어하는 것이 중요하므로, 이 상태 변수에 많은 가중치를 둔다. 또, 각속도 ω의 변화가 δ의 변화를 야기하므로 ω의 가중치를 δ보다 큰 값으로 주어, 제어기의 성능을 향상시킨다[6].

R의 경우, 본 논문에서는 UPFC 전압 크기에 제한(0.5p.u.)이 있으므로, 그 값보다 작게 나오도록 하기 위해서, R의 값을 크게 선정하였다.

이 때, 상태 추정기인 Kalman filter의 동력학(Dynamics)과 Linear Quadratic(LQ) 제어 법칙은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{x}_{k+1} = A\,\hat{x}_k + Bu_k + H(y_k - C\,\hat{x}_k) \qquad (14)$$

$$u_k = -G\,\hat{x}_k$$

여기서, $\hat{x}_k$는 추정된 상태변수이다.

식 (14)에서 Kalman 필터의 동력학은 필터 이득 행렬 H에 의해 지배되는데, 이 H는 아래의 필터 대수 Riccati 방정식의 해인 P로부터 구해진다.

$$APA^T - P + W - APC^T(CPC^T + V)^{-1}CPA^T = 0 \qquad (15)$$

$$H = APC^T(CPC^T + V)^{-1}$$

또, 식 (14)에서 LQ 제어기의 동력학은 제어 이득 행렬 G에 의해서 지배되는데, 이 G는 아래의 제어 대수 Riccati 방정식의 해인 K로부터 구해진다.

$$A^TKA - P + Q - A^TKB(R + B^TKB)^{-1}B^TKA = 0 \qquad (16)$$

$$G = (R + B^TKB)^{-1}B^TKA$$

5. 시간 영역 모의

본 논문에서 제시한 제어 방법의 효과를 확인하기 위해서 시간 영역 모의를 해 보았다. 외란으로서는 UPFC가 없는 선로 즉, Z2의 한 가운데에서 3상 3주기 사고가 난 경우를 상정하였다. 그림 4에서 제어시와 비제어시를 비교해 보면, 비제어시에 비하여 제어시에는 제어 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

그림 5와 6은 제어시의 d축과 q축의 보조 제어 입력 Vdsup와 Vqsup이다. 그림 7과 8은 d축과 q축의 UPFC 전압값 Vdpq와 Vqpq이다. 그림 5와 6에서 보조 제어 입력 Vdsup와 Vqsup의 값을 보면, 절대값이 너무 크다고 생각되지만, 그림 7과 8을 보면, 1차 지연 요소 때문에 보조 제어 입력 신호와 같은 값이 되는 데는 시간이 걸리므로, 결과적인 UPFC 전압값 Vdpq와 Vqpq은 가정한 최대값 0.5p.u. 범위 안에 있는 것을 알 수 있다.

아래 그림4-8에서 가로축의 단위는 시간(초)이다.

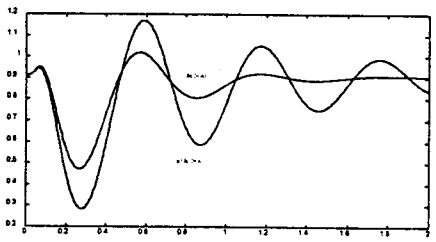

그림 4. 제어시와 비제어시의 상차각 δ (rad)

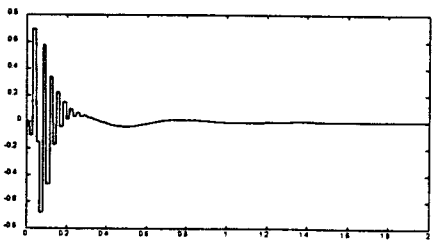

그림 5. d축 보조 제어 입력 Vdsup (p.u.)

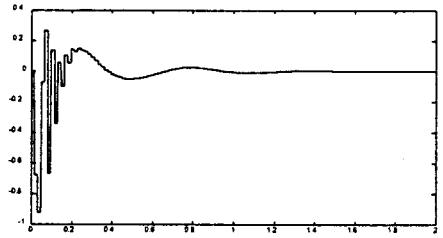

그림 6. q축 제어 입력 Vqsup (p.u.)

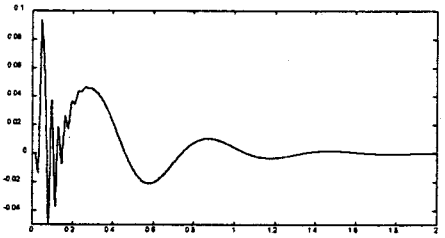

그림 7. UPFC d축 전압 Vdpq (p.u.)

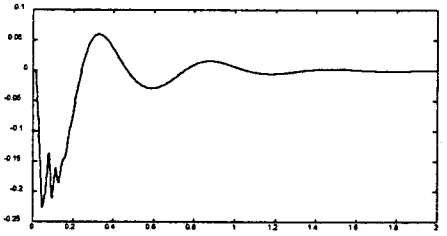

그림 8. UPFC q축 전압 Vqpq (p.u.)

6. 결 론

본 논문에서는 UPFC를 제어하여 저주파 진동 현상을 효과적으로 억제할 수 있음을 보였다. UPFC는 크기와 위상이 제어 가능한 가변 전압원으로 보았다. UPFC의 동적인 특성은 1차 지연 모형으로 나타내었다. 제어 입력으로는 측정이 가능한 수전단의 유효 전력과 무효 전력을 이용하였다. 제어 기법으로서는 LQG를 사용하였다. 본 논문에서 제시한 1차 지연 모형에 대한 검증이 안 되어 있는데 향후 검증할 계획이며, 실제 UPFC에서 제어하기 위해서는 UPFC의 GTO의 점호각 계산이 되어야 하는데 향후 계산할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] 박 종근, "신 전력 전송 시스템", 대한 전기 학회 춘계 전력 계통 연구회 논문집, 1993.

[2] L. Gyugui, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, A. Edris, "the UPFC for Independent P and Q Flow Control in Transmission Lines" EPRI FACTS 3 conference, Oct. 1994

[3] L. Gyugui, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, A. Edris, "the UPFC : a New Approach to Power Tranismission Control" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, Apr. 1995

[4] J. C. Seo, T. H. Kim, J. K. Park, S. I. Moon, "LQG Based PSS Design for Controlling the SSR in Power Systems with Series-Compensated Lines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, pp. 423-428, Jun. 1996

[5] P. K. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw Hill, 1994

[6] Yao. Nan Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic Press, 1983