

UPFC와 직렬 커패시터 결합 시스템의 모델링과 주파수 응답

임수생\*, 이은웅\*, 오영웅\*, 김석곤\*\*  
 충남대\*, 전력연구원\*\*

Modelling and frequency response of the combination system of a UPFC and Series capacitor

Lim, Su-Saeng\*, Lee, Eun-Woong\*, Oh, Young-Woong\*, Kim, Suk-Kon\*\*  
 Chungnam National Univ\*, KEPRI\*\*

**Abstract** - The UPFC has attracted great interests, as it has the unique capability of controlling active and reactive power flow as well as line voltage. Because the high cost for the high power converter, the combination of an UPFC and conventional series capacitor is proposed. The Damping and Resonance frequency and the effect of the open-loop poles are studied.

전단 발전기측으로 전달된다고 볼 수 있다. 이것은 두 컨버터사이의 직류링크가 삽입된 직렬 전압원과 송전단 버스사이에 양방향으로 결합하고 있는 UPFC의 회로 구성과 일치한다.

1. 서론

전력수요의 증가에 따라 직면하게 되는 많은 문제점들을 전송계통에 유연성을 줌으로써 해결하고자 하는 노력의 일환으로, 일체형 전력조류 제어기(unified power flow controller; UPFC)는 교류 전송계통의 실시간 제어와 동적 보상을 위해 제안되었다[1],[2].

UPFC는 GTO벨브로 된 두 개의 전압원 컨버터 시스템으로 구성된다. 계통에 적용되는 대전력 전압원 컨버터는 매우 고가이므로 UPFC의 실용화를 어렵게하고 있다. 따라서, 성능을 떨어뜨리지 않고 UPFC의 용량과 비용을 줄일 수 있는 현실적인 방안이 필요하게 되었다. 상용의 직렬 커패시터는 전송선로의 유효전력 전송을 증가시키는 가장 경제적이고 효과적인 수단으로 사용되고 있다. 그러나, 전력전송 선로의 낮은 댐핑때문에, 고정 직렬 커패시터는 전송 선로의 인덕턴스와 결합하여 자칫 차동기 문제를 유발할 수도 있는데[3], 이는 빠른 전력조류 제어가 가능한 UPFC에 의해 극복할 수 있다. 따라서, UPFC와 직렬 커패시터의 결합 시스템은 UPFC의 크기와 비용을 줄이는 동시에 전력계통의 동특성을 향상시키고 정상상태 전력전송 용량을 증진할 수 있을 것이다.

본 논문에서는, UPFC와 직렬 커패시터 결합시스템의 구조를 제안하고 동기회전좌표계에서 모델링하고 전달함수를 도출하여 결합시스템의 댐핑과 공진 주파수를 검토한다.

2. 전력조류 제어의 기본원리

그림 1은 UPFC가 연결된 기본 전송시스템을 나타낸다. UPFC는 선로와 직렬로 연결된 가변 전압원으로 표현되고 선로를 따라 전달되는 무효전력을 발생하거나 흡수할 수 있으나, 송전단 발전기가 공급하는 유효전력을 흡수하거나 발생한다. 선로에 직렬로 삽입된 UPFC 전압은 페이저  $V_S$ 에 대해 측정된 진폭이  $V_U$  ( $0 \leq V_U \leq 0.5p.u.$ )이고 각도가  $\theta_U$  ( $0 \leq \theta_U \leq 90^\circ$ )인 페이저로 나타낸다. 페이저 I로 표시된 선전류는 직렬 전압원  $V_U$ 를 통해 흐르고 유효전력과 무효전력을 교환하게 한다. UPFC를 적절히 표현하기 위해, 직렬 전압원을 무효전력  $Q_U$ 만을 발생하여 선로와 교환한다고 제한하자. 그러면, UPFC와 송전단 발전기 사이에 완전히 결합되었다면 선로를 따라 흐르는 유효전력  $P_U$ 는 송

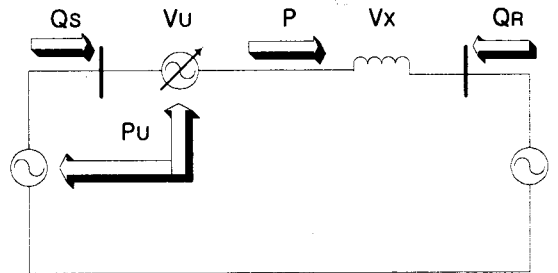


그림 1. UPFC가 연결된 기본 전송 시스템

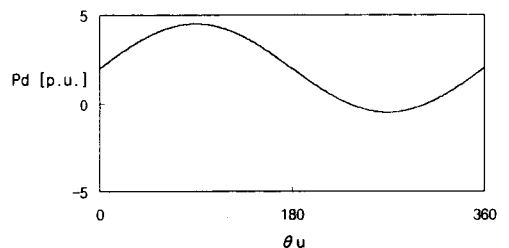
그림 1에서 보듯이, UPFC의 병렬 무효전력 보상은 이용하지 않는다고 가정한다. 즉, UPFC의 병렬 컨버터는 단일 역률로 동작하고 역할은 단지 송전단 발전기로부터 직렬 컨버터가 요구하는 유효전력을 전달하는 것이다. 이와 같은 가정하에서, 송전단 발전기와 결합된 유효전력을 가진 직렬 전압원은 기본적인 UPFC를 정확하게 표현하고 있다. 유효 송전단 전압을  $V_S + V_U$ 로 볼 수 있다. 그러므로 UPFC는  $V_U$ 의 진폭과 각도를 조절함으로써 유효 송전단 전압을 제어함으로써 어떤 송전단과 수신단사이의 상차각에서도 무효전력 수요 및 전송 가능 유효전력을 제어할 수 있다.

그림1의 전압 페이저를 복소수로 표현하면  $V_S = V_S \angle \theta_S$ ,  $V_U = V_U \angle \theta_U$ ,  $V_R = V_R \angle \theta_R$ 이고, 유효송전전압  $V_D$ 는 식 (1)과 같고 수신단에 전달되는 전력  $S_D$ 는 식(2)와 같다.

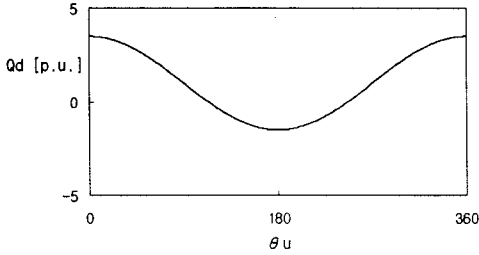
$$V_D = V_i + V_S \tag{1}$$

$$S_D = P_D + jQ_D = V_D \cdot \left( \frac{V_D - V_R}{Z_L} \right) \tag{2}$$

식 (1)과 (2)로부터, 유효전력  $P_U$ 와 무효전력  $Q_U$ 을 상차각  $\theta_U$ 에 따라 나타내면 그림 2와 같다.



(a) 삼입전압 상차각 대 유효전력



(b) 삼입전압 상차각 대 무효전력

그림 2. 삼입전압의 상차각 대 유효 및 무효전력

### 3. 동기회전좌표계 모델링과 전달함수

그림 3은 UPFC와 직렬 커패시터가 설치된 전송선로의 단상 등가회로이다. 직렬 컨버터의 용량이 작아지므로, 병렬 컨버터는 주로 STATCOM으로 역할을 한다 [4]. 따라서, 직렬 컨버터와 병렬 컨버터를 분리하여 제어할 수 있고, 병렬 컨버터의 영향을 해석에서 고려하지 않는다.

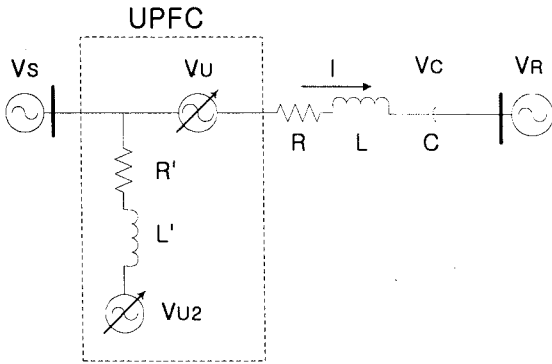


그림 3. UPFC와 직렬 커패시터 결합시스템이 설치된 전송선로의 단상 등가회로

그림 3의 등가회로를 순시값의 변수로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$L \frac{di_k}{dt} = -Ri_k - v_{C,k} - v_{U,k} + v_{S,k} - v_{R,k} \quad (3a)$$

$$C \frac{dv_{C,k}}{dt} = i_k \quad (3b)$$

여기서, k는 a, b, c 상을 나타낸다. 삼상 시스템을 동기회전 좌표계로 변환하면 dq성분의 관계로 식 (4)의 방정식을 얻을 수 있다.

$$L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega_1 Li_q - v_{Cd} - v_{Ud} + v_{Sd} - v_{Rd} \quad (4a)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -\omega_1 Li_d - Ri_q - v_{Cq} - v_{Uq} + v_{Sq} - v_{Rq} \quad (4b)$$

$$C \frac{dv_{Cd}}{dt} = i_d + \omega_1 Cv_{Cq} \quad (4c)$$

$$C \frac{dv_{Cq}}{dt} = i_q - \omega_1 Cv_{Cd} \quad (4d)$$

수전단축의 유효전력과 무효전력도 식(5)와 같이 dq 성분의 전압과 전류로 표현할 수 있다.

$$p = \frac{3}{2} (v_{Rd} i_d + v_{Rq} i_q) \quad (5a)$$

$$q = \frac{3}{2} (v_{Rq} i_d - v_{Rd} i_q) \quad (5b)$$

정상상태 안정점부근에서 변수에 교란을 인가함으로써 선형 모델 얻을 수 있다. 변수, 임피던스, 주파수를 정규화한다음, 선형 상태변수 모델은 식 (6)과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6a)$$

$$y = Cx + Du \quad (6b)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{X_L} & 1 & -\frac{1}{X_L} & 0 \\ -1 & -\frac{R}{X_L} & 0 & -\frac{1}{X_L} \\ X_C & 0 & 0 & 1 \\ 0 & X_C & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{X_L} \\ -\frac{1}{X_L} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} V_{Rd0} & V_{Rq0} & 0 & 0 \\ V_{Rq0} & -V_{Rd0} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta v_{Uq} \\ \Delta v_{Ud} \end{bmatrix}$$

$$x = [\Delta i_d \ \Delta i_q \ \Delta v_{Cd} \ \Delta v_{Cq}]^T \quad y = [\Delta p \ \Delta q]^T$$

시스템은 식 (7)과 같이 전달함수로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta v_{v2q} \\ \Delta v_{v2d} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = G(s) = C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B + D$$

따라서, 유효 및 무효전력 조류 제어는 그림 4와 같이 구성된다. 그림 4에서, 전달함수 G는 UPFC의 직렬 컨버터를 나타내고 K는 컨트롤러를 가리킨다.

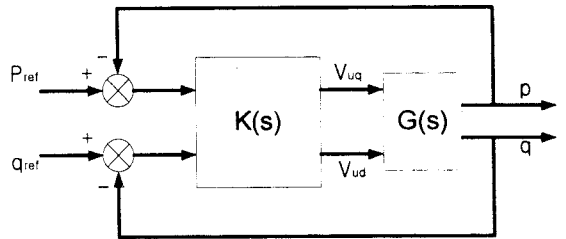


그림 4. 직렬 컨버터 제어 블록 다이어그램

### 4. 댐핑과 공진주파수

그림 5와 같은 시험대상 선로의 파라미터(표 1)를 사용하여, 행렬 G의 각 전달함수 요소에 대한 주파수 응답은 그림 6과 같다. 그림 6에서, UPFC와 직렬커패시터 결합시스템은 2개의 공진주파수를 가지고 있고, 또한 주파수가 0.25 [p.u.] 이상에서 유효전력 제어루프와 무효전력제어루프사이의 상호연결이 매우 크다.

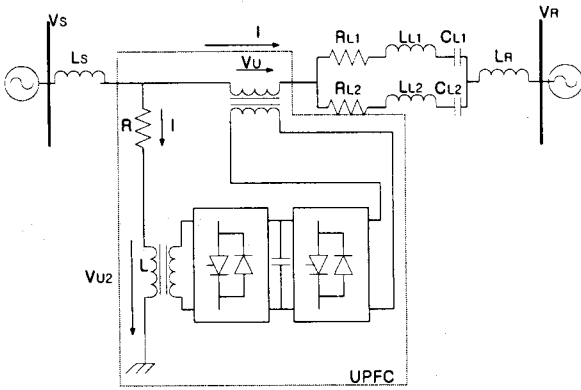


그림 5. 시험 대상선로

표 1. 시험 대상선로의 파라미터

$\delta$	$30^\circ$
$L_S = L_R$	53.05 mH
$R_{L1} = R_{L2}$	16 $\Omega$
$L_{L1} = L_{L2}$	413.8 mH
$C_{L1} = C_{L2}$	24.11 $\mu F$
$V_S = V_R$	$500\sqrt{2/3}$ kV

즉, 위의 주파수 범위에서 상호결합 전달함수 ( $G_{12}(s)$ ,  $G_{21}(s)$ )의 이득이 직접 전달함수 ( $G_{11}(s)$ ,  $G_{22}(s)$ )보다 같거나 높다. 이는 상용주파수범위에서 UPFC의 dq축 변수를 각각 조절함으로써 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어할 수 있음을 뜻한다.

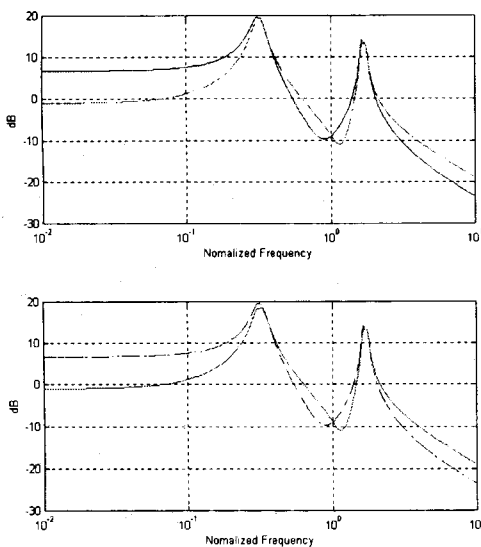


그림 6. 개루프 전달함수 행렬의 주파수 응답

행렬 A의 고유치로부터 개루프 전달함수의 극점을 결

정하여 도시하면 그림 7과 같다. 그림 7에서, 모든 극점이 s 평면의 좌반면에 존재하므로, 시스템이 점근적으로 안정하다고 볼 수 있다. 댐핑을 결정하는 극점의 실수부는 매우 작아서 실수부의 최소값은 0.0406이고, 가능 공진주파수를 결정하는 극점의 허수부는 각각  $\pm 0.32$  [p.u.]와  $\pm 1.68$ [p.u.]이다.

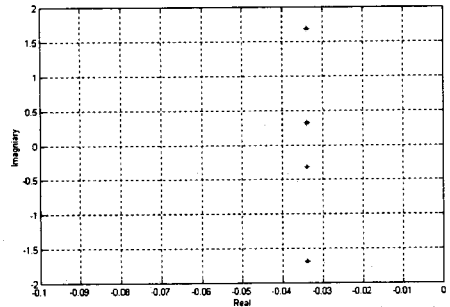


그림 7. 개루프 전달함수의 극점

그런데, 전송 선로의 인덕턴스와 직렬로 연결된 직렬 커패시터는 직렬공진회로를 형성한다. 정지좌표계에서, 공진주파수  $f_e$ 는 식 (8)과 같다.

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

전원주파수  $f$ 로 회전하는 동기회전좌표계에서, 이 공진주파수  $f_e$ 는 2개의 대역폭 ( $f_e \pm f_1$ )을 갖는다. 시험대상선로에서 공진주파수는 전원주파수의 0.68배이고, 상응하는 2개의 대역폭은 0.32 [p.u.]와 1.68 [p.u.]인데, 이것은 극점의 허수부 값과 일치한다. 전송 선로의 인덕턴스 L이나 커패시턴스 C가 변함에 따라 2개의 공진주파수도 바뀔 것이다. 전력조류 제어에 보다 중요한 낮은 값의 공진주파수에 대해, 인덕턴스나 커패시턴스가 감소할 때 공진주파수도 감소할 것이다. 따라서 시스템의 자연주파수  $f_e \pm f_1$ 이 불확실하므로 직렬공진을 방지하기 위해 강인성 제어 컨트롤러를 사용하여야 할 것이다.

### 3. 결 론

UPFC와 직렬 커패시터를 결합함으로써 비용을 절감할 수 있는 방안을 제시하였다. UPFC와 직렬커패시터 결합시스템은 2개의 공진주파수를 가지고 있고, 유효전력 제어루프와 무효전력제어루프사이의 상호연결이 매우 큼을 확인하였고, 선로의 상태에 따라 시스템의 자연주파수가 심하게 변하므로 빠른 동특성을 갖는 UPFC의 특성이 요구된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] L. Gyugyi, et al., "Generalized Fast Power Flow Controller", US Patent Number 5,343,139, August, 1994
- [2] M. Ea. Rahman, "Unified Power Flow Controller System Studies and its Application on the AEP System", IEEE NewYork FACTS/HVDC Workshop, September, 1995
- [3] 이은용, 이민명, 김일중, "차동기 공진현상에서 터어보발전기 회전자의 전기적 특성과 wedge의 영향", 대한전기학회지 40권 4호, pp.407-416, 1991
- [4] 임수생, 이은용, 오영웅, 김석곤, "자가변전설비용 정지형 동기보상기의 전압안정 및 역률개선", 1998년도 전기기기연구회 춘계학술발표회 합동논문집, pp. 48-51, 1998