

FCATS Device를 이용한 송전전력 제어

박승호*, 김영조**, 김영석*

*인하대학교 전기공학과, **유한대학 컴퓨터제어과

Transmission Power Control using FACTS Device

Seung-Ho Park*, Young-Jo Kim**, Young-Seok Kim*

*Dept. of Electrical Engineering of Inha University, **Dept. of Computer Aided control Engineering of Yuhan

Abstract - This paper presents an electric power control scheme in the transmission line using a UPFC(Unified Power Flow Controller). From the practical application viewpoint, the simultaneous realization of the power response desired. The author propose a new power control algorithm for UPFC. To verify the effectiveness of the proposed algorithm, a prototype inverter is built and some experiments are carried out.

1. 서 론

전력수요의 증가와 구조개편의 영향으로 전력시스템의 계획 및 운용이 이전보다 더욱 복잡해지고 있다. 증가하는 전력수요에 맞추어 전력시스템을 안정하게 운영하기 위해서는 기본적으로 신규발전기나 선로의 건설이 필요하다. 그러나, 설비 부지 문제를 비롯하여 투자효과에 비하여 전력중대효과는 미비할 수도 있다. 이러한 문제로 새로운 발전기의 설치나 선로의 건설보다는 기존의 송전선로의 용량을 극대화 하는 방법인 유연송전시스템, 즉, FACTS(Flexible AC Transmission System)가 대두되었다. 계통의 안정도 향상을 위해서 FACTS를 적용한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이 연구에서는 대표적인 유연송전기기인 UPFC(Unified Power Flow Controller)를 고려하였다[1][2][3]. 본 논문에서는 UPFC의 송전전력 제어법을 제안한다. 제안하는 송전전력 제어법에서는 순시전류제어계를 구성하고, 안정적인 송전전력제어계를 실현하였다. 전류제어계에서 수전단 전압의 위상과 진폭의 정보가 필요한데, 이러한 시스템의 간소화와 신뢰성 향상을 위해, 수전단전압을 직접 검출하는 대신에 그 내부의 정보로 수전단 전압을 추정하는 방법을 제안하였고, 제안된 제어법의 유효성을 시차시스템으로 실험하고 확인하였다.

2. 본 론

2.1 송전전력제어

송전단 전압 v_s 이 정현파일때 상전압 v_{su}, v_{sv}, v_{sw} 는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} v_{su} \\ v_{sv} \\ v_{sw} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_s \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{pmatrix} \quad (1)$$

이와 같이 송전전력제어를 할때 위상각 θ 의 진행방향을 p축, p축에서 $\pi/2$ 만큼 회전한 축을 q축이라 정의 한다. 회전좌표계(p-q좌표계)로 (1)식을 송전단 전압 v_s 를 3상-2상 변환행렬 C

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

로 좌표변환하면 전압 v_{sp}, v_{sq} 는

$$v_s = \begin{pmatrix} v_{sp} \\ v_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_s \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

로 나타낼수 있다.

같은 방법으로 송전전류 i_s 를 3상-2상 변환하여 i_{sp}, i_{sq} 를 구하고, 송전전력의 유효전력을 p, 무효전력을 q라고 하면 아래와 같다.

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{sp} & v_{sq} \\ -v_{sq} & v_{sp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sp} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = V_s \begin{pmatrix} i_{sp} \\ i_{sq} \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.2 병렬형 인버터의 제어법

송전전류 i_s , 병렬 인버터의 입력지령전류 i_c^* , 직렬 인버터의 지령 전류 i_r^* 라 할때

$$i_r^* = i_s^* - i_c^* \quad (5)$$

이 성립한다.

병렬 인버터에서 직류전압 V_{dc} 가 일정하게 제어하기 위해 지령전압 V_{dc}^* 을 검출하여, 직류전압과의 오차를 이용해 PI연산을 실시한다. 병렬 인버터의 입력지령전류 i_c^* 의 p축 성분 i_{cp}^* , q축 성분 i_{cq}^* 을 산출하여 전류를 제어한다.

2.3 직렬형 인버터의 제어법

직렬형 인버터가 전압원, 병렬형 인버터를 전류원 라 할때 p-q좌표계의 전압방정식을 아래와 같이 표시한다.

$$v_s + v_c - v_r = R_s i_r + L_s \frac{d}{dt} i_r + \omega L_s J i_r \quad (6)$$

$$I = \begin{pmatrix} 10 \\ 01 \end{pmatrix}, J = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

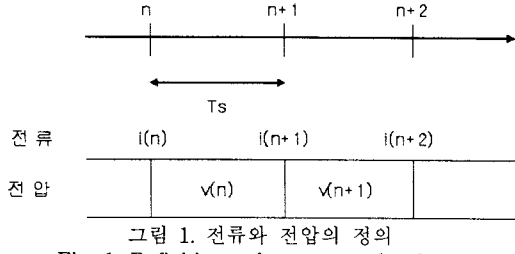


그림 1. 전류와 전압의 정의
Fig. 1. Definitions of current and voltage

제어를 위해 그림 1과 같이 주기 T_s 의 이산시간계를 고려하여 전류미분 $\frac{di_r}{dt}$ 로 제어전압 $v_c(n+1)$ 에 대해 정리하면

$$v_c(n+1) = \frac{L_s}{T_s} \{i_r(n+2) - i_r(n+1)\} + (R_s I + \omega L_s J) i_r(n+1) - v_s(n+1) + v_r(n+1) \quad (7)$$

를 얻는다. 사전에 계측된 선로정수를 점 n 의 정보로 계산하면 지령전압 $v_c^*(n+1)$ 은

$$v_c^*(n+1) = \frac{L_s}{T_s} \{i_r^*(n+2) - i_{rM}(n+1)\} + (R_s I + \omega L_s J) i_{rM}(n+1) - v_{sM}(n) + v_{rM}(n) \quad (8)$$

가 된다. (8)식의 지령전류 $i_r^*(n+2)$ 는 점 n 의 정보로 계산하였다. $i_r(n+1)$ 는 $i_{rM}(n+1)$, $v_c(n)$ 는 $v_c^*(n)$, $v_r(n)$ 는 $v_{rM}(n)$ 로 치환하면

$$i_{rM}(n+1) = i_r(n) + \frac{T_s}{L_s} \{v_c^*(n) + v_s(n) - v_r(n) - (R_s I + \omega L_s J) i_r(n)\} \quad (9)$$

를 얻을수 있다.

2.4 수전단 전압 추정

제안된 선로전류제어를 위해서는 수전단 전압 V_r 의 정보가 필요하다. 제어시스템의 간소화를 위해 수전단 전압 V_r 의 추정법을 제안한다. 검출기를 이용해 얻은 점 $n+1$ 에서의 실전류는 다음과 같이 표시된다.

$$i_r(n+1) = i_r(n) + \frac{T_s}{L_s} \{v_c^*(n) + v_s(n) - v_r(n) - (R_s I + \omega L_s J) i_r(n)\} \quad (10)$$

위 식에서 실전류 $i_r(n)$ 과 추정전류 $i_{rM}(n)$ 의 전류오차 $\Delta i_{rM}(n)$ 은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta i_{rM}(n) &= i_r(n) - i_{rM}(n) \\ &= -\frac{T_s}{L_s} \{v_r(n-1) - v_{rM}(n-1)\} \\ &= -\frac{T_s}{L_s} \Delta v_r(n-1) \end{aligned} \quad (11)$$

수전단 전압 추정 시정수 K_v 를 이용하면 추정수전단 전압 v_{rM} 은

$$v_{rM}(n) = -K_v \Delta i_{rM}(n) + v_{rM}(n-1) \quad (12)$$

가 된다. 추정시정수 $T_e (= L_s / K_v)$ 이다.

2.5 시스템 구성

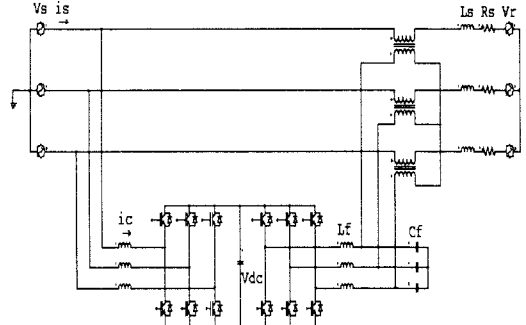


그림 2. UPFC 실험장치 구성도
Fig. 2. Experimental system configuration

그림 2은 UPFC의 축소모형과 제안된 제어법을 실험하기 위한 간단한 모의 송전계통의 축소모형의 실험장치 구성도를 나타낸 것이다. 실험에서 V_s 와 V_r 를 송전선에서의 송전단과 수전단으로 가정하였다. 제작된 UPFC는 V_s 와 V_r 간의 유효전력과 무효전력을 제어하는 것이며 송전단에 설치되었고 직류전압 V_{dc} 를 공유한다. 직렬과 병렬 인버터는 각각 3상 풀 브릿지 인버터로 구성하였고, 직렬 인버터의 각 출력단에는 인버터에서 발생하는 스위칭 리플을 저감하기 위하여 인덕터와 커패시터를 연결하였다. 제안된 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 12kVA의 시스템을 제작하였고 실험에 사용된 시스템의 회로 정수는 표 1과 같다. IGBT의 정격은 600V/100A이며, DSP는 TMS320C6701을 사용하여 제어하였다.

<표 1> 시스템 회로정수
Table 2. System parameter

전원전압	110[Vrms], 60[Hz]
결합변압기 권수비	1:2
선로저항[Rs]	0.1[Ω]
선로 인덕턴스[Ls]	0.2[mH]
인버터 DC링크 콘덴서	4700[uF]
LC필터 인덕턴스[Lf]	4[mH]
LC필터 콘덴서[Cf]	0.5[uF]

2. 6 실험결과

- [1] Hideaki Fujita, Yasuhiro Watanabe, Hirofumi Akagi, "Control and Analysis of a Unified Power Flow Controller", IEEE Trans, Vol 14, No 6, 1999
- [2] A.Garcia-Cerrada, P.Garcia-Gonzalez, "Control System for a UPFC in a Transmission Line", EPE Journal, 10, 54, 2000
- [3] Takaharu Takeshita, Takeshi Kuroda, Yasunobu Toyota, Nobuyuki Matsui, "전압포화를 고려한 UPFC의 고속송전력전력제어" T.IEE Japan, Vol 122-D, No. 9, 2002

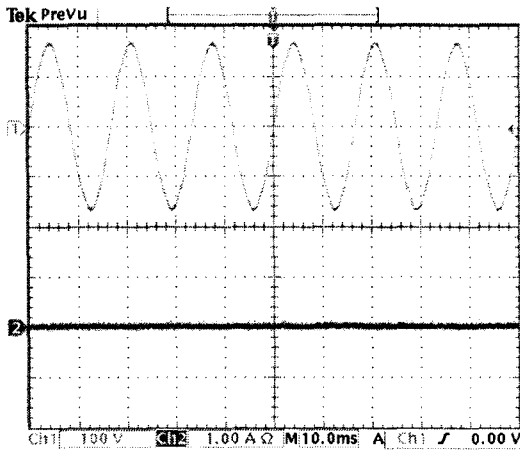


그림 3. 송전전압 및 선로전류
Fig. 3. Sending Voltage and Line Current

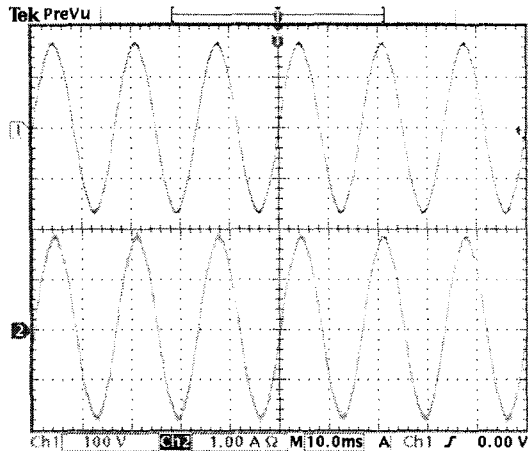


그림 4. UPFC 동작시 송전전압 및 선로전류
Fig. 4. Sending Voltage and Line Current using UPFC

위의 실험에서 나타난 것과 같이 UPFC로써 송전전압과 선로전류를 제어하여 유효전력과 무효전력의 제어가 가능함을 보여준다. 직렬 인버터의 경우 유효전력을, 병렬 인버터의 경우 무효전력을 제어하고 직류전압 V_{dc} 를 일정하게 제어한다.

3. 결 론

본 논문에서는 송전전력시스템에서 유효전력과 무효전력을 제어하기 위한 UPFC의 제어 알고리즘을 제시하였다. 송전전력시스템에서 UPFC의 간소화와 신뢰성 향상을 위해, 수전단 전압을 직접 검출하는 대신에 그 내부의 정보로 수전단 전압을 추정하는 방법을 제안하였고, 제안된 제어법을 사용하여 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있음을 실험을 통하여 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2006년 중소기업청의 지원에 의하여 연구되었음.(S0504222-F0420410-10100020)