

UPFC용량을 고려한 FACTS 적용 효과 연구

윤중수*, 원종률, 장병훈, 전영수, 오관일, 이기선, 추진부
한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실

The Effects of FACTS Application Considering UPFC Capacity

Jong-Su Yoon, Jong-Ryul Won, Byung-Hoon Jang, Young-Soo Jeon, Kwan-Il Oh, Ki-Sun Lee, Jin-Boo Choo

Abstract - This paper describes a power flow method for the unified power flow controller(UPFC) considering equipment sizes and constraints. The operation of UPFC subject to the practical constraints encountered in an actual high power installation. So the power flow method for FACTS must be considered its constraints for power system analysis. The proposed UPFC power flow method was implemented by PSS/E and IPLAN.

1. 서론

현재 FACTS설비를 적용한 전력계통에서의 FACTS 투입 효과분석에 대한 연구가 정상상태 및 안정도해석을 중심으로 활발히 진행되고 있다. [1] 이들 적용 효과분석의 기본적인 단계라 할 수 있는 계통해석에는 검증된 상용 프로그램들이 많이 이용되지만, 최신 FACTS기기의 경우 모델이 제공되지 않는 경우가 많다. 그중 UPFC와 같은 FACTS기기의 경우 별도의 프로그램으로 모델을 작성하게 되는데, PSS/E의 IPLAN언어가 대표적이다. 최근 IPLAN을 이용하여 UPFC의 조류모형 및 안정도 해석모형을 개발하는 연구가 많은 성과를 거두어왔다. [2] 이때 UPFC의 조류계산모델은 UPFC의 제어효과를 동기조상기와 부하로 등가화 하여 정상상태에서의 모션전압과 선로 조류제어의 효과가 반영된 조류계산 해를 구하는 기법이 주로 사용된다. 이를 통하여 UPFC의 병렬 인버터측의 전압설정치와 직렬 인버터측의 유효, 무효전력 설정치를 통하여 원하는 계통의 FACTS 적용 효과와 그에 필요한 UPFC용량을 계산한다. 이러한 방법은 UPFC의 설치치 제어에 따른 계통해석에는 매우 효과적이거나, 계통계획 측면에서 특정계통에 적용할 최적의 UPFC용량을 도출하는데 상당한 어려움을 준다. 이것은 UPFC의 특성상 제어범위가 매우 광범위하여 설정치에 따라 요구되는 UPFC용량의 편차가 매우 커지기 때문이다. 본 논문은 정상상태에서 설치된 UPFC의 용량을 고려한 UPFC 설정치 제어를 제한하고 실제계에 적용하여 UPFC 정적효과를 분석하였다. 이 과정은 PSS/E와 IPLAN을 이용하였다.

2. UPFC 조류계산 모델

2.1 UPFC 모델

UPFC는 직병렬 인버터로 구성되어 송전선로의 전력 조류와 모선의 전압을 제어하게 되는데 정상운전시 병렬 인버터는 모션전압의 자동 설정치 제어(Automatic Voltage Control Mode)를, 직렬 인버터는 주입전압의 크기와 위상각 조절을 통한 전력조류 설정치 제어(Automatic Power Flow Control Mode)를 주로 담당하게 된다. [3] 이때 병렬 인버터는 단자전압을 설정치 제어 하기 위하여 송전선로로부터 전류를 유입하여 무효전류는 전압보상, 유효전류는 DC전압유지를 위하여

사용되며 유효전력이 직렬 인버터로 공급된다. 이러한 DC전압을 바탕으로 직렬 인버터는 주입전압의 크기와 위상각을 조절하여 조류제어를 하게된다.

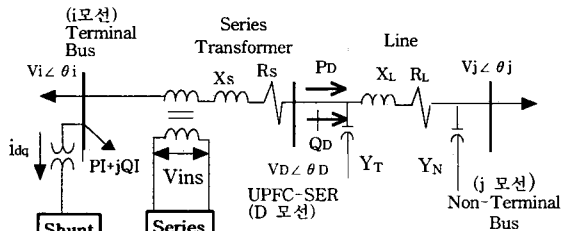


그림 1. UPFC 구성도

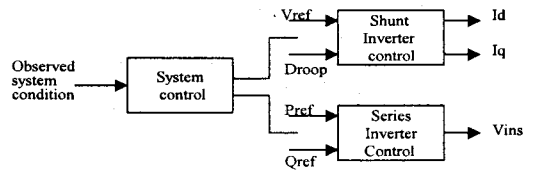


그림 2. UPFC 제어도

그림 1과 그림 2는 UPFC의 구성도 및 직병렬 인버터의 제어블록도이다. 그림 1에서 직렬 인버터 주입전압 제어시 선로 조류는 식 (1)과 같고 직렬 변압기를 무시한다면 UPFC 비제어시 송전선로의 조류는 식 (2)과 같다. 따라서 식 (1)과 (2)는 식 (3)의 관계가 성립한다.

$$S_D = P_D + jQ_D = \overline{V}_D \cdot \left(\frac{\overline{V}_i + \overline{V}_{ins} - \overline{V}_j}{Z_L} \right)^* \quad (1)$$

$$S_0 = P_0 + jQ_0 = \overline{V}_D \cdot \left(\frac{\overline{V}_i - \overline{V}_j}{Z_L} \right)^* \quad (2)$$

$$S_D = \overline{V}_D \cdot \left(\frac{\overline{V}_i - \overline{V}_j}{Z_L} \right)^* + \overline{V}_D \cdot \left(\frac{\overline{V}_{ins}}{Z_L} \right)^* \quad (3)$$

$$= S_0 + \frac{\overline{V}_D \overline{V}_{ins}^*}{Z_L}$$

여기서 Z_L 는 직렬변압기와 송전선로의 등가임피던스이다. 송전선로의 전력조류의 형태를 P-Q 복소평면에 나타내면 주입전압 V_{ins} 의 크기 및 위상의 제어에 따라 조류 S_D 가 S_0 를 중심으로 $\left| \frac{\overline{V}_D \overline{V}_{ins}}{Z_L} \right|$ 의 반지름을 가진 원형으로 나타낼 수 있다.

2.2 UPFC 조류계산 모델

이러한 UPFC의 동작을 조류계산에 반영하기 위하여 병렬 인버터 부분을 동기조상기와 부하로 모의하고 발전기 모션으로 취급한다. 직렬인버터 부분은 동기 직렬 전압원으로 모의하는 것이 요구되나 조류계산에서는 그림 3과 같이 직렬부분의 선로를 절단하고 새로운 가상모선(Dummy bus)을 통해 선로에 설정된 유효전력과 무효전력을 주입하는 방법이 사용된다. 이때 조류의 흐름은 병렬단과 가상모선에서의 양의 부하 및 음의 부하주입으로 모의한다.

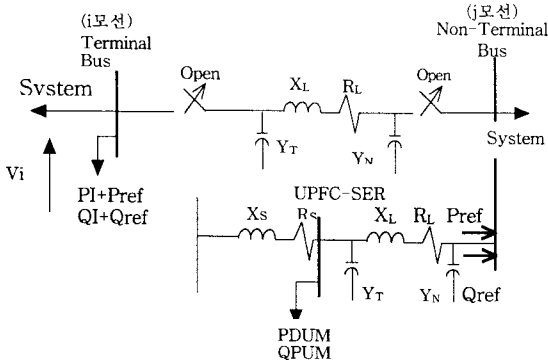


그림 3. UPFC 조류계산 모형

2.3 UPFC의 제약조건

UPFC의 V_{ref} , P_{ref} , Q_{ref} 설정치 제어는 실제로는 UPFC의 용량의 한계에 의해 제한된다. 직렬 인버터의 용량은 주입전압 V_{ins} 의 크기와 송전선로 전류의 곱으로 나타나는데, 그림 4와 같이 직렬 인버터의 전력조류 설정치 제어시 용량을 벗어나는 설정치 값(P, Q) $_{ref}$ 에 대하여 실제 제어는 (P, Q) $_{limit}$ 만큼 이루어진다. 이때 병렬모선 전압 V_i 가 병렬 인버터에 의해 설정치 제어되고 주입전압 V_{ins} 의 크기가 용량에 의해 한정되어 있으므로 자유변수는 V_{ins} 의 위상각이 된다. 따라서 그림 4의 (V_{ins}) $_p$ 는 V_{ins} 의 위상각을 변화시켜 P_{ref} 값에 일치하는 새로운 조류 설정치 (P, Q) $_p$ 를 찾는 방법을 나타낸다. 즉 P 의 설정치 제어를 위하여 무효전력 설정치를 적절히 조정하였다.

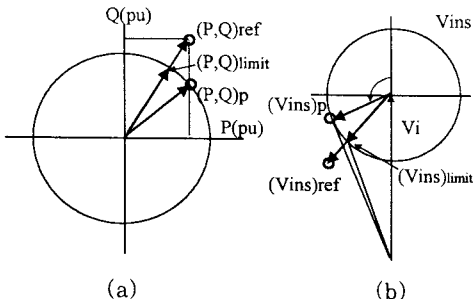


그림 4. 선로조류 PD-QD와 주입전압 벡터도

2.4 설비용량을 고려한 UPFC 조류제어

조류계산에서 UPFC설비용량 및 운전계약 조건을 고려하기 위하여 OPF프로그램이 필요하나, 여기에선 송전선로의 유효전력 설정치 제어를 우선시하는 간단한 조류계산 기법을 사용한다. 식 (3)의 송전선로 조류식은 주입전압의 위상각을 소거시 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$A(P_D - P_C)^2 + B(P_D - P_C)(Q_D - Q_C) + C(Q_D - Q_C)^2 = D^2 \quad (4)$$

$$\text{여기서 } P_C = P_0 + \frac{V_{ins}^2 R'}{R^2 + X'^2}, Q_C = Q_0 + \frac{V_{ins}^2 X'}{R^2 + X'^2}$$

$$A = 4 X'^2 [V_i^2 - V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] - 4 R' X' V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) + V_i^2 (R^2 + X^2)$$

$$B = -8 R' X' [V_i^2 - V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] + 4 V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) (R^2 + X^2)$$

$$C = 4 R'^2 [V_i^2 - V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] + 4 R' X' V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) + V_i^2 (R^2 + X^2)$$

$$D = V_i [2 V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) - V_j^2]$$

식 (4)에서 R', X' 는 직렬 변압기와 선로의 등가 리액턴스이며 식 (4)는 그림 4(a)의 타원 방정식이다. UPFC의 병렬 인버터의 용량은 직렬 인버터에 전달되는 유효전력과 전압보상을 위하여 공급한 무효전력의 절대값(피상전력)으로서 실제 UPFC 적용시 용량증설은 기존의 커패시터 설비로 대체할 수 있다. 따라서 직렬 인버터 용량을 고려한 UPFC조류계산은 그림 5와 같은 과정으로 이루어진다.

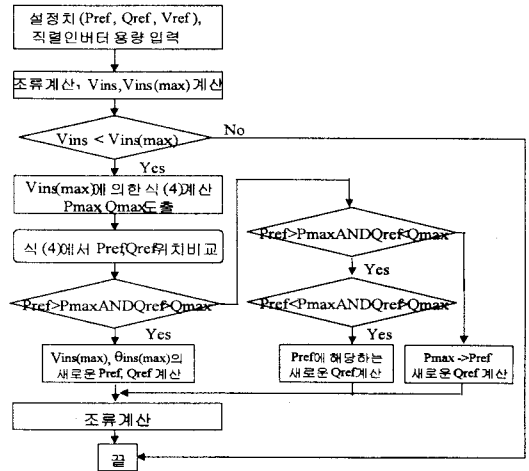


그림 5. 용량을 고려한 UPFC 조류계산 과정

3. 사례 연구

이상의 방법을 사용하여 실제통 해석에 다음과 같이 적용하여 UPFC 적용효과를 분석하였다.

- 대상계통 : 2003.2005년 한전계통(하계 침두부하시)
- UPFC 적용선로 : 154kV 둔포-추발선로
- UPFC 용량 : 직렬 50MVA, 병렬 고려않음
- 계통상황 : 345kV 화성-아산선로 3상 단락사고시
- 적용목적 : 345kV 화성-아산선로 사고시의 둔포-추발선로의 UPFC설정치 제어를 통한 모션 전압유지 및 선로 과부하 해소

3.1 2003년 계통 Case

- 사고전 조류 : 둔포-추발 98.5MVA, 94.7-j27.2 (선로정격 192MVA의 50.8%)
서천안-둔포 118MVA, 116.6-j15.7 (선로정격 192MVA의 60.6%)
- 사고후 조류 : 둔포-추발 215.8MVA, 209.7-j50.6 (선로정격 192MVA의 113%)
서천안-둔포 235.1MVA, 232.6-j34.2 (선로정격 192MVA의 123%)

둔포-추발 선로전력량 (과부하%)	설정치 제어값			UPFC용량			계통상황 (과부하 선로%)
	Pref	Qref	Vref	Sr	SH	Total	
200MVA (104%)	140	-142	1	38.4	196.3	234.6	추발-평택(107%)
180MVA (93.7%)	120	-135	1	39.4	189.0	228.3	-

3.2 2005년 계통 Case

- 사고전 조류 : 둔포-추발 115MVA, 111.9-j28.4
(선로정격 192MVA의 61%)
서천안-둔포 142MVA, 141.4-j12.5
(선로정격 192MVA의 74%)
- 사고후 조류 : 둔포-추발 241.5MVA, 236.0-j50.8
(선로정격 192MVA의 129%)
서천안-둔포 268.5MVA, 267.0-j28.4
(선로정격 192MVA의 123%)

둔포-추발 선로전력량 (과부하%)	설정치 제어값			UPFC용량			계통상황 (과부하 선로%)
	Pref	Qref	Vref	Sr	SH	Total	
220MVA (114.5%)	160	-142	1	57.2	138.1	195.3	서천안-둔포(107%), 추발-평택(115%)
Qref조정	160	-137	1	50.0	103.4	153.1	서천안-둔포(107%), 추발-평택(111%)
200MVA (104.1%)	140	-142	1	54.7	120.9	175.6	추발-평택(109%), 천안S-천안(107%)
Qref조정	140	-133	1	50.0	93.9	143.4	천안S-천안(106%)
180MVA (93.7%)	120	-135	1	54.3	188.1	242.4	천안S-천안(111%)
Qref조정	120	-124	1	50.0	88.4	138.3	천안S-천안(110%)

이상은 2003년, 2005년 계통 Case에서 345kV 화성-아산 사고시 154kV 둔포-추발선로와 서천안-평택선로의 과부하 해소를 위하여 둔포-추발선로에 UPFC를 설치하여 임의의 설정치를 제어한 결과를 정리한 것이다. 적정 설정치 제어를 통하여 서천안-둔포간의 과부하를 해소할 수 있음을 보여주고 이에 따른 기기용량을 도출하였다. 2005년의 경우 UPFC의 제어를 통하여 서천안-둔포지역에서 해소된 과부하가 천안S-천안간의 과부하를 발생시킬 수 있음을 나타내고 있다.

3. 결 론

본 논문은 UPFC의 용량을 고려한 조류계산을 제안하고 실제통에서의 UPFC 적용효과를 분석하였다. 기존의 정적 UPFC 적용효과 분석은 UPFC가 Vref, Pref, Qref 설정치 제어를 가정하고 조류계산을 통하여 계통 분석 및 UPFC 필요용량을 도출하였으나 UPFC의 특성상 설정치 제어에 따른 필요 용량의 편차가 심하여 계통계획 및 운용의 측면에서 실제 설비용량을 고려한 적용효과 분석에 많은 반복을 요구한다. 본 논문은 조류계산을 통한 UPFC의 설정치 제어의 효과와 용량을 고려한 적정 설정치 운전치 도출의 기초적인 단계로서 직렬인버터 용량만을 고려하였으나 향후 최적의 설정치 도출기법과 직렬 인버터 용량을 함께 고려하는 알고리즘에 대한 연구를 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- (1) 한전전력연구원, "FACTS 계통운용 기술개발에 관한 연구", 최종보고서, 1999.
- (2) 국경수, 김학만, 전진홍, 오태규 "IPLAN을 이용한 UPFC조류계산 모형", 대한전기학회 추계학술대회 논문집,

1998

[3] C.D.Schauder, L.Gyugyi, M.R.Lund, "Operation of the unified power flow controller(UPFC) under practical constraints", IEEE Trans. Power Delivery, pp.630-639, Vol.13, No.2, April 1998

[4] Bian,D.G.Ramey,R.J.Nelson "A study of equipment sizes and constraints for a unified power flow controller" IEEE Trans. Power Systems, pp. 332-338, Vol. 1996.