

한전계통에서의 80MVA UPFC 적용연구(Ⅰ)

- 기대효과 분석 -

추진부 임성주 장병훈 전영수 윤종수 오관일
한국전력공사 전력연구원

The Application Study of 80MVA UPFC on the KEPCO Power System
- Site Selection -

Jin-Boo Choo Sung-Ju Im Byung-Hoon Chang Young-Soo Jeon Jong-Su Yun Kwan-II Oh
Korea Electric Power Research Institute of KEPCO

Abstract - 본 논문은 한전의 "FACTS 계통운용 기술 개발연구(Ⅱ단계:80MVA UPFC 도입, 설치)" 연구과제에서 수행된 연구내용 중 위치결정의 배경 및 기대효과에 대한 사항을 일부 발췌하여 논문으로 작성하였다. 위 연구과제는 한전 전력연구원과 (주)효성 중공업연구소, 전기연구소, 기초연, 미국의 Siemens사가 공동으로 참여하여, 80MVA UPFC(Unified Power Flow Controller) 시스템, 변압기, 통신장치 등을 제작, 설치하여 2003년 4월에 완료되는 과제이다. 전력연구원은 80MVA UPFC가 효율적이고, 경제적인 운용이 가능하도록, 한전 본사 관련부서와 협의, 전남지역의 154kV 강진변전소를 설치위치로 최종 결정하였다.

2. 본 론

2.1 대상계통 특성

345kV 광양-신강진 T/L 건설이 2005년에서 2010년 이후로 계획이 변경되어, 전남 일부 지역 154kV 계통의 불안정 현상이 발생하게 된다. 이 문제해결을 위해 선로 건설 등 154kV 계통보강 계획을 하여도, 여전히 345kV 신광주~신화순 T/L 루트고장시 345kV 신광주 S/S M.Tr 과부하, 관련 154kV T/L 과부하, 345kV 신강진 모선에 연결된 154kV 계통의 전압 저하 등의 계통 불안정현상에 대한 문제가 여전히 남게된다.

1. 서 론

본 논문은 80MVA UPFC를 한전계통에 적용하기 위한 연구내용 중 설치위치 결정에 관련된 연구내용이 기술되었다. 일부 한전계통 계획변경에 의해 특정 상정사고시 전남 강진지역의 전압불안정과 일부선로 과부하가 예상되어, 이에 대한 대책으로 80MVA UPFC 적용에 대한 연구가 수행되었다. 초기 과정에서 이 지역의 설치부지에 대한 조사가 수행되어 설치 후보지가 최종 2개소로 선정되었으며, 적용효과와 주위여건 등을 고려하여 최종 154kV 강진변전소로 위치가 결정되었다. 구체적으로는 UPFC의 병렬인버터측은 154kV 강진모선으로 연결하고, 직렬인버터측은 154kV 강진-장흥간 선로와 연결하는 방안을 확정하였다.

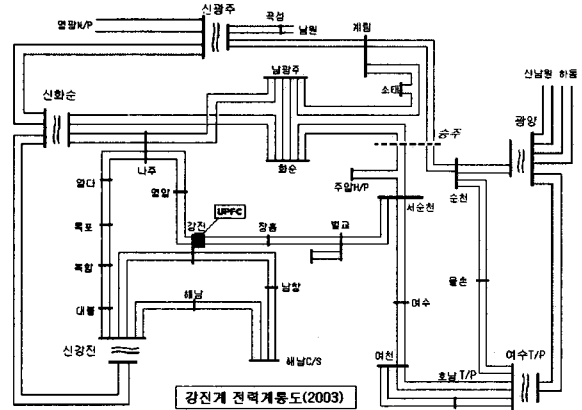


그림 1 UPFC 설치위치 인근 계통도

본 논문에서는 한전 계통계획 변경에 따른 문제상황을 설정하고, 이에 대한 해결방안으로 제시된 전남지역 일부 계통보강과 80MVA UPFC 설치에 대한 적절한 위치선정의 계통해석 방법과 기대효과 등을 기술한다. 특정 상정사고에 대해 주어진 문제상황에서 80MVA UPFC 설치시 향상된 기대효과가 나타나도록, 전남지역 일부 계통보강에 대한 방법과 위치와 80MVA UPFC의 설치위치가 결정되었다.

2.1.1 보강전 특성

그림 1에서와 같이 345kV 신광주-신화순간 2회선 루트 고장시 345kV 신강진 모선은 전원 공급단으로서의 역할을 상실하여, 강진부근의 154kV 계통은 전원단과 매우 멀어지게 된다. 따라서, 위 상정사고시 강진지역의 154kV 모선들은 저전압현상이 발생하게 되며, 강진부근의 154kV 계통 부하에 필요한 전력은 주로 345kV 신광주 변전소를 통해 공급 받게되어, 이 변전소의 345/154kV 변압기와 인근 154kV 신광주-계림간 선로의 과부하가 발생하게된다.

위치결정과정에서는 주로 조류계산에 의한 전압보상 및 과부하 해소정도가 주요 지표로 사용되었다. UPFC는 매우 빠른 동특성으로 적용선로에 대해 원하는 유효 및 무효전력을 공급하고, 적용모선에 원하는 전압을 유지시키는 특징을 가지는 있어, 상정사고시 과도특성을 거의 가지지 않고, 신속하게 원하는 제어가 가능한 설비이므로, 상정사고후 계통상황에 대한 조류계산으로 해석된 결과에 의한 저전압 및 과부하 개선 등의 적용효과 분석이 우선적으로 위치결정에 대한 지표로 사용될 수 있다.

2.1.2 보강후 특성

345kV 신광주-신화순간 루트사고시 발생하는 위와 같은 문제에 대한 해결방안으로 154kV 계통보강계획이 수립되었다. 이 계획은 강진부근의 154kV 계통부하의 전력공급을 일부 345kV 광양 변전소에서 부담하도록 하는 방안으로서 그림1과 같이 154kV 승주변전소를 2004년에 건설하는 것이다.

UPFC의 신속한 제어특성을 이용한 계통 동특성 향상 적용방안도 위치결정에서 고려되었다. 설치위치인 154kV 강진변전소는 제주-해남간 HVDC 송전을 위한 해남변환소가 인근하여 있으며, 80MVA UPFC의 동적 제어에 의해 해남 변환소측의 조류 진동시 댐핑이 가능하는 등, 전남지역 계통의 동특성 향상이 가능하며, 이에 대한 상세연구는 현재 진행중에 있다.

이 계획에 따라 154kV 계통을 보강하는 것으로 가정

하였을 때, 345kV 신광주-신화순간 루트사고시 발생하는 강진지역의 저전압은 표1과 같으며, 이때의 345kV 신강진 변전소 변압기와 154kV 신광주-계림간 선로 과부하는 표2와 같다. 따라서, 345kV 신광주-신화순간 루트사고에 대한 계통문제점은 여전히 남아있다.

표 1 상정사고시 154kV 저전압 모선 (pu)

구분	운남	엄다	목포	북항
2003년	0.927	0.926	0.920	0.921
2004년	0.956	0.955	0.949	0.950
2005년	0.950	0.950	0.946	0.948
2006년	0.942	0.943	0.939	0.941
2010년	0.903	0.906	0.899	0.901

표 2 상정사고시 과부하 선로

구분	신광주 #1 TR		광주-계림 T/L	
	MVA	%	MVA	%
2003년	532.8	106.6	424.3	95.6
2004년	556.1	111.2	455.4	102.6
2005년	596.5	119.3	496.4	111.8
2006년	607.3	121.5	504.9	113.7
2010년	683.9	136.8	629.4	141.8

2.2 UPFC 적용계통 분석방법

위치결정을 위한 계통분석 방법은 문제상황에 대한 해결방안의 특성에 의해 결정되며, 서론에서 언급한 바와 같이 상정사고후 조류계산에 의한 저전압 및 과부하 해소정도를 주요 지표로 사용하였다.

조류계산에서 사용된 UPFC의 모델은 그림 2와 같이 PSS/E V26 프로그램에서의 등가계통에 대한 모델을 이용하였다.

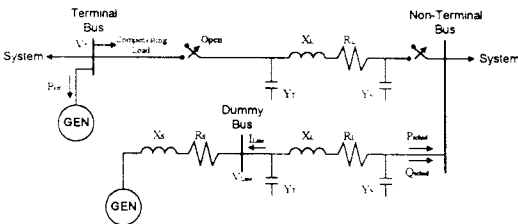


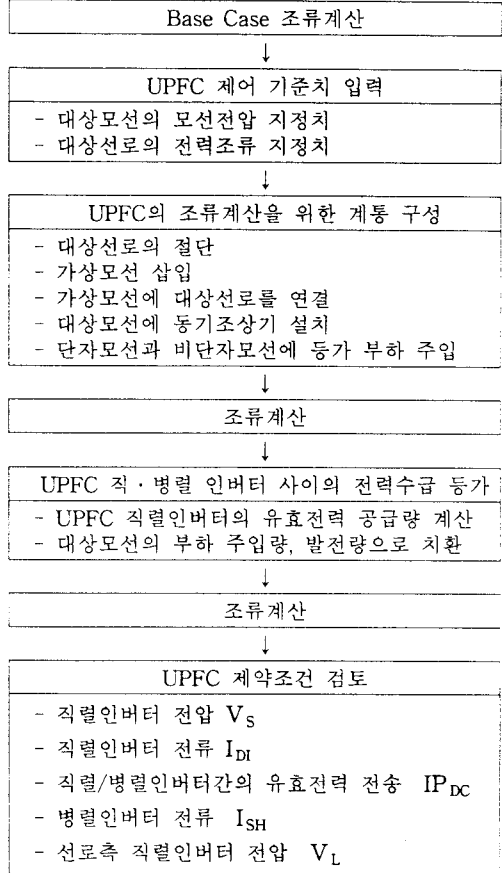
그림 2 UPFC 등가계통

2.2.1 분석절차

UPFC의 조류계산 모델을 이용한 계통해석은 표 3과 같은 절차로 수행되었다.

여기서 UPFC 기기 내부 정격에 따른 동작범위 한계를 제약조건으로 고려하여 조류계산을 수행한다. 그림 3은 P-Q 평면상에 UPFC 기기 내부 정격에 따른 동작점 범위를 나타낸 것으로 제약조건에 따라 동작범위 내로 재조정되는 지정치 P_{shcd}, Q_{shcd} 의 궤적을 보여준다. 조류계산에서는 먼저 UPFC 제약조건이 없는 상태에서 대상선로의 지정된 P_{shcd}, Q_{shcd} 및 STATCOM 모션전압에 따른 조류계산을 수행한 뒤 그 결과와 각 제약 조건을 비교한다. UPFC 기기 내부 제약조건은 직렬인버터 전압 V_S , 직렬인버터 전류 I_{DI} , 직렬/병렬인버터간의 유효전력 IP_{DC} , 병렬인버터 전류 I_{SH} , 선로측 직렬인버터 전압 V_L 등 5가지가 존재하며, 조류계산 결과가 UPFC 제약조건을 위반한 경우에는 순차적인 방법으로 모든 제약조건들을 만족하도록 조류계산을 재수행한다.

표 3 UPFC 조류계산 절차



2.2.2 제어범위 정칙화

직렬인버터 전압/전류가 한계값을 넘어선 경우에는 지정된 P_{shcd}, Q_{shcd} 동작점과 비보상시 동작점 P_0, Q_0 사이의 일직선상에서 지정된 P_{shcd}, Q_{shcd} 보다 작은 새로운 지정치를 각각 식 (1),(2)와 (3),(4)를 통해 구해서 직렬인버터 전압/전류 제약조건을 만족시킨다.

직렬인버터 전압 V_S 가 한계값을 초과할 때 P_{shcd}, Q_{shcd} 의 재조정에 대한 식은 다음과 같다.

$$P_{shcd} = P_{shcd} - \left[\frac{P_{shcd} - P_{shcd1}}{V_S - V_{S1}} \right] \cdot (V_S - V_{Smin} + 0.01) \cdot T_{ACC} \quad (1)$$

$$Q_{shcd} = Q_0 + \left[\frac{Q_{shcd} - Q_0}{P_{shcd} - P_0} \right] (P_{shcd} - P_0) \quad (2)$$

직렬인버터 전류 I_{DI} 가 한계값을 초과할 때 P_{shcd}, Q_{shcd} 의 재조정 값은 다음과 같다.

$$P_{shcd} = P_{shcd} - \left[\frac{P_{shcd} - P_{shcd1}}{I_{DI} - I_{DImin}} \right] \cdot (I_{DI} - I_{DImin} + 0.01) \cdot T_{ACC} \quad (3)$$

$$Q_{shcd} = Q_0 + \left[\frac{Q_{shcd} - Q_0}{P_{shcd} - P_0} \right] (P_{shcd} - P_0) \quad (4)$$

직렬/병렬 인버터간의 유효전력은 지정된 Q_{shcd} 값에

따라 결정되며, STATCOM에 적용되는 전류 제약조건으로 작용한다. 즉 IPLAN 프로그램에서는 STATCOM 단자전압과 동상인 STATCOM 전류성분을 계산하여 이 값이 한계값을 초과하면 지정된 무효전력값 Q_{shced} 를 식 (5)를 통해 보다 크게 조정하여 유효전력이 한계값 내에 있도록 한다.

직렬/병렬인버터간의 유효전력 IP_{DC} 가 한계값을 초과할 때 Q_{shced} 의 재조정은 다음과 같다.

$$Q_{shced} = Q_{shced} - \left[\frac{Q_{shced} - Q_{shced1}}{IP_{DC} - IP_{DC1}} \right] \cdot \left[IP_{DC} - (IP_{DC_{max}} - 0.01) \cdot \frac{IP_{DC1}}{|IP_{DC1}|} \right] \cdot T_{ACC} \quad (5)$$

병렬인버터 전류의 제약조건은 STATCOM을 대신하는 발전기 무효전력 출력의 상한한 값을 재조정함으로써 만족시킨다. 병렬인버터 전류 I_{SH} 가 한계값을 초과할 때 병렬인버터 VAR_{max} , VAR_{min} 의 재조정은 다음과 같다.

$$VAR_{max} = (QR - (I_{SH_{max}}^2 \cdot X_{SH} \cdot MVA_{BASE})) \cdot 0.9 \quad (6)$$

$$VAR_{min} = (-QR - (I_{SH_{max}}^2 \cdot X_{SH} \cdot MVA_{BASE})) \cdot 0.9 \quad (7)$$

여기서,

$$QR = (\sqrt{I_{SH_{max}}^2 - IP_{DC}^2}) \cdot V_T \cdot MVA_{BASE}$$

직렬인버터의 선로측 전압의 제약조건은 지정된 Q_{shced} 값을 재조정하여 제약조건을 만족시킨다. 선로측 직렬인버터 전압 V_L 가 한계값을 초과할 때 Q_{shced} 의 재조정은 다음과 같다.

$$Q_{shced} = Q_{shced} - \left[\frac{Q_{shced} - Q_{shced1}}{V_D - V_{D1}} \right] (V_D - V_{LIMIT}) \cdot T_{ACC} \quad (8)$$

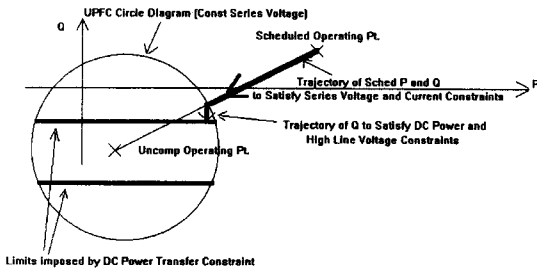


그림 3 제약조건에 따른 UPFC 동작범위

IP_{DC} 과 V_L 제약조건이 충돌할 때 P_{shced} , Q_{shced} 의 재조정은 다음과 같다. 직/병렬 인버터간의 유효전력 한계와 직렬인버터의 선로측 전압 한계는 모두 Q_{shced} 에 의해 제약을 받으며 서로 trade-off 관계이다. 즉 직/병렬 인버터간의 유효전력이 한계값을 초과하면 이를 줄이기 위해 Q_{shced} 를 증가시키게 되는데 이 경우 직렬인버터의 선로측 전압은 전압 한계치를 넘어설 만큼 증가한다. 이러한 상호 대립하는 상황이 발생하면 P_{shced} 를 새롭게 조정하여 두 개의 제약조건을 동시에 만족시키도록 한다. 식 (9), (10)은 두 개의 제약조건을 만족시키는 새로운 P_{shced} 과 그에 따른 Q_{shced} 를 구하는 식이다.

$$P_{shced} = Q_{shced} - \left[\frac{P_{shced} - P_{shced1}}{IP_{DC} - IP_{DC1}} \right] \cdot \left[IP_{DC} - 0.75 \cdot IP_{DC_{max}} \cdot \frac{IP_{DC1}}{|IP_{DC1}|} \right] \cdot T_{ACC} \quad (9)$$

$$Q_{shced} = Q_0 + \left[\frac{Q_{shced} - Q_0}{P_{shced} - P_0} \right] (P_{shced} - P_0) \quad (10)$$

2.3 UPFC 적용효과 분석

FACTS 설비의 위치결정 문제는 주어진 문제상황에 대해 적용효과가 극대화 될 수 있는 곳을 선정하여야 한다. 본 연구과정에서는 특정 상정사고시 발생하는 계통 불안정 현상을 해결하는 방안으로서 위치가 결정되었으며, 부가적으로 정상상태시 선로손실 감소에 대한 비용 절감 효과가 분석될 수 있다.

본 논문에서는 UPFC의 계통제어에 대한 구체적방안이 수립되기 이전의 설치대상위치 결정을 위한 연구범위에 국한되었다. 따라서 가능한 UPFC의 용량범위내에서 계통적용 효과가 나타나도록 모의한 결과이다. 다음은 대상계통의 345kV 신광주-신화순간 루트사고시 154kV 강전변전소에 80MVA UPFC를 적용할 경우에 대한 전압개선효과, 과부하 개선효과, 조류제어효과, 손실감소효과 등 분석되었다.

2.3.1 저전압 개선효과

그림 4, 5에서 보인 154kV 운남, 목포 모선은 상정사고시 저전압이 발생되었던 모선으로서, 2003년의 경우 UPFC 적용시 0.92pu의 전압을 0.97pu 까지 보상할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 상정사고시 기설의 기계식 스위치로 동작되는 병렬 캐패시터가 투입될 수 없는 점을 감안하여, UPFC 적용시 병렬보상에 의한 전압 개선 효과가 매우 큰 것 분석되었다.

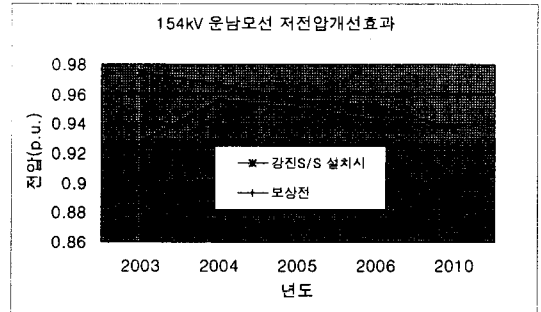


그림 4 UPFC 설치시 154kV 운남모선 전압개선 효과

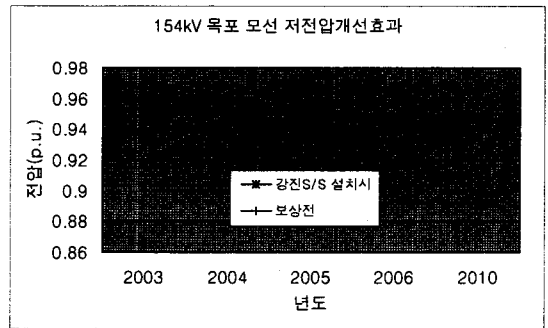


그림 5 UPFC 설치시 154kV 목포모선 전압개선 효과

2.3.2 과부하 개선효과

그림 6, 7에서 보인 345kV 신광주 #1 변압기와 154kV 신광주-계림 #1 선로는 상정사고시 과부하가 발생되었던 선로이다. 2005년의 경우 UPFC 적용시 345kV 신광주 #1 변압기는 596.5MVA에서 583.2MVA로 13.3MVA의 과부하 개선효과를 보였으며, 이는 345kV

신광주 변전소가 3bank의 변압기가 운전되고 있는 것으로 고려하여, 총 39.9MVA의 과부하 개선효과를 보이는 것으로 분석되었다. 이는 154kV 신광주-계림 선로에서도 비슷하게 분석되어, UPFC 적용시 직렬보상에 의한 원거리 선로의 간접적인 조류제어로 직렬 인버터 용량과 유사한 39.9MVA의 과부하를 개선할 수 있어, 대상계통에 대한 과부하 해소에 기여가 될 것으로 분석되었다.

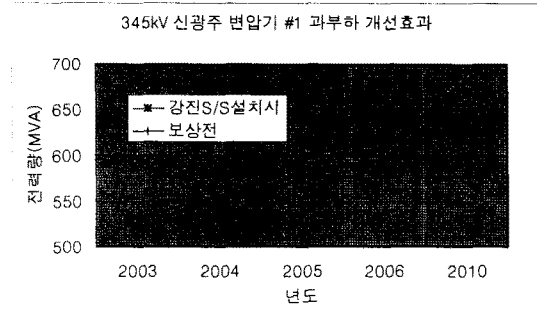


그림 6 UPFC 설치시 345kV 신광주 #1 변압기 과부하 개선효과

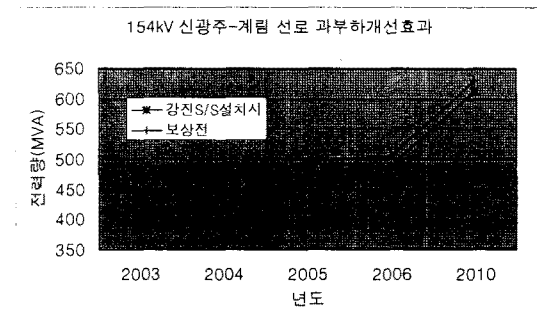


그림 7 UPFC 설치시 154kV 신광주-계림 선로 과부하 개선효과

2.3.3 조류제어 효과

정상상태에서 UPFC 적용시 최대 조류제어량을 분석하였다. 이 결과는 직렬 변압기 용량을 결정하는데 필요한 자료로 이용될 수 있으며, UPFC가 인근 계통에 미치는 영향을 분석하는 자료로 이용되게 된다. 표 4와 같이 분석된 최대 조류제어량은 약 120MVA 정도로 직렬 인버터 용량의 3배까지 제어가 가능한 것으로 분석되었다.

표 4 UPFC 적용시 최대 조류제어 효과

구분	154kV 강전-장흥 선로 조류변화 (MVA)	
	1회선	루트(2회선)
2003년	54.8	109.6
2004년	60.8	121.6
2005년	73.9	147.8
2006년	64.9	129.8
2010년	59.4	118.9

2.3.4 선로손실 감소효과

정상상태에서 UPFC의 조류제어에 의한 계통손실 감소효과를 분석하였다. 분석결과 약 1MVA 정도의 손실 감소효과가 있는 것으로 나타났으며, 판매단가 44.86원/kWh를 적용하여 경제성을 평가하면, UPFC의 정상상태 조류제어에 의해 연간 약 4억원의 경제적 이익이 가능한 것으로 분석되었다.

표 5 UPFC 적용시 손실감소 효과

연도	정상상태시 손실감소 효과
2003	1.0 MVA
2004	1.5 MVA
2005	0.6 MVA
2006	1.1 MVA
2010	1.0 MVA

3. 결 론

한전 전력연구원에서 수행하고 있는 연구과제를 통해 한전계통에 설치될 80MVA UPFC 적용연구 중 계통에 미치는 기대효과에 대한 분석내용을 기술하였다. UPFC 적용시 기대효과는 상정사고시 저전압, 과부하 개선효과와 정상상태시 손실감소 효과가 있을 것으로 분석되었다. 그러나, UPFC의 전력계통 운용을 위한 운전전략에 대한 연구가 아직 완성되지 않아 정확한 기대효과를 도출하지는 못하였다.

향후 UPFC에 의한 한전계통의 동특성 향상을 위한 연구와 UPFC 최적제어를 위한 운전전략 연구가 진행될 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한전 전력연구원, (주)효성 중공업연구소, "FACTS 계통 운용 기술개발 연구(Ⅱ단계) 과제 중간보고서", 2001년 1월
- [2] CIGRE TF 14-27 "Unified Power Flow Controller", 1998년 8월
- [3] A.S.Ben Mehraban 외 "Controlling the Flow of Real and Reactive Power", IEEE Computer Applications in Power, 1998년 1월