

UPFC 자동운전 시스템 개발에 관한 연구

안선주*, 문승일*, 윤종수**, 장병훈**, 김수열**, 문승필**
* 서울대학교, ** 한전 전력연구원

A study on the automatic operation system of UPFC

S.J. Ahn*, S.I. Moon*, J.S. Yoon**, B.H. Chang**, S.Y. Kim**, S.P. Moon**
*Seoul National University, **Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 우리나라는 154kV 강진변전소에 2003년 3월 부터 80MVA급 UPFC를 설치 운전하고 있다. 현재 UPFC는 지역급전소 운전자에 의한 수동 설정치 운전방 식으로 운전되고 있는데, 설비의 효율성을 향상시키고 계통의 안정화에 기여하기 위해서는 계통의 상태를 분석 하여 최적의 운전방안을 도출하고 이를 자동으로 UPFC 에 지령을 내리는 상위 제어가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 상위제어의 구조 및 기능을 제안하고, 정상 상태에서 UPFC 운전에 적용될 수 있는 운전방안에 대 하여 논하였다.

1. 서 론

현재 우리나라는 전력수요는 급격하게 증가하고 있는 데 반해 전력 생산 및 전송 설비의 신규 건설은 환경과 지리적 문제 등 여러 가지 사회적, 경제적 제약으로 어 려움이 따르고 있다. 따라서 기존의 전력설비를 보다 효 율적으로 활용하기 위한 방법으로 유연 송전 시스템 (FACTS)에 대한 연구를 활발히 진행하였고, 그간의 연 구를 바탕으로 강진변전소에 80MVA 용량의 UPFC를 설치하여 상용운전하고 있다[1].

FACTS 기기가 전력계통에 설치될 경우 그 특성이 기 존 계통과는 확연히 달라질 수밖에 없으므로 대규모적인 적용을 위해서는 정밀한 해석기술을 바탕으로 한 운용 및 제어기법을 필요로 한다. 그간의 연구를 통하여 FACTS 기기의 모델링 및 해석 기술이 개발되어 왔는 데, 향후 FACTS 기기의 대규모적인 계통 적용을 위해 서는 FACTS 기기가 계통에 미치는 영향을 정확히 평 가, 분석하고 주변 계통 상황에 따라 적절한 운용 전략 을 수립해야 할 필요성이 있다. 현재 강진 UPFC는 변전 소 및 지역급전소에서 지정된 운전 시나리오에 따라 수 동 설정치 운전(Set-point control) 방식으로 운영되고 있다. 그러나 계통의 환경은 항상 가변하며 다양한 원인 에 의하여 예상하지 못한 외란이 발생하므로 수동 설정 치 운전방식으로는 이러한 계통의 변화에 대응하는 데에 한계가 있다. 따라서 신속한 계통의 안정화 제어와 FACTS 기기의 최적 운용을 위해서 SCADA에서의 FACTS 자동운전 시스템의 개발이 요구된다. 본 논문에 서는 지역급전소의 SCADA 시스템과 연계하여 자동으 로 UPFC의 운전 모드 및 운전 지령값을 결정하는 UPFC 상위 제어 시스템의 구조 및 역할을 정의하고, 강 진 UPFC를 대상으로 하여 정상상태에 주변 계통의 특 성을 고려한 최적의 운전방안을 도출한다.

2. 본 론

2.1 상위제어의 기능 및 구조

지역계통 SCADA와 연계하여 UPFC를 제어하는 상위 제어기의 구조 및 기능은 다음과 같다.

2.1.1 상위 제어기의 기능

· 계통 상태 분석

평시에 계통의 RTU로부터 입력 받은 아날로그 데이 터를 분석하여 주기적으로 계통의 상황을 판단하고, 선 로 사고 등 계통의 사고 발생시 디지털 입력 데이터로부 터 즉각적으로 계통의 상태를 판단한다. 지역계통 SCADA의 데이터 취득 주기를 고려하여 계통 상태 판 단 주기를 결정하며, 정상 상태, 모선 전압 저하, 선로 조류 혼잡, 선로 사고 상황 등으로 구분한다. 또한 계통 해석을 통하여 모선의 중요도를 파악하여 집중 감시 모 선 및 선로 등을 선정하여 상황 판단에 가중치를 적용한 다.

· 제어 목적 결정

다음으로 계통 상태 분석을 근거로 적합한 제어 목적 함수를 결정한다. 오프라인 계통 해석을 통하여 각 상태별 최적의 목적 함수 및 운전 시나리오를 미리 결정하여 적 용한다. 정상상태 시에는 계통의 손실 최소화, 주변 조상 설비와의 협조 제어 고려, 특정 모선의 전압 유지 등의 목적함수를 생각할 수 있으며, 운전제한 상태 시에는 모 선 전압 유지, 계통 혼잡 해소 등의 계통 상황에 따른 목적함수를 결정한다.

· OPF의 수행

앞에서 결정된 계통 상태 및 제어 목적에 따라 UPFC 의 운전모드를 결정하고, UPFC RTU로부터 입력 받은 기기의 상태 데이터를 참고하여 UPFC의 운전 제한치 결정한다. 다음으로 결정된 제어 목적 및 운전모드에 따 라 OPF를 수행한다. 이때에 전압 및 조류에 관한 인텍 스를 적용한 제어 방법 등을 이용하여 UPFC의 최적 운 전 파라미터를 결정한다.

· UPFC 지령 레퍼런스 결정

OPF의 수행 결과를 이용하여 P_{ref} , Q_{ref} , V_{ref} 등의 UPFC 제어 레퍼런스를 결정하고 이를 UPFC RTU로 전달한다.

2.1.2 상위 제어기의 구조

UPFC 상위 제어기의 구조는 그림1과 같다. 서론에서 언급한 바와 같이 상위 제어기는 지역계통 SCADA와 연계하여 계통 및 UPFC RTU와 데이터를 주고 받는다.

계통으로부터 SCADA로 입력되는 데이터는 계통의 조류, 전압, 전류와 같은 아날로그 데이터와 차단기의 접 점 정보 등과 같은 디지털 데이터로 구분할 수 있다. 아 날로그 입력 데이터는 관할하는 계통의 전체 RTU로부 터 차례로 입력을 받고 있으며, 현재 신장진 전력소에서 전체 RTU의 아날로그 입력 데이터를 받는 데는 약 12 초 정도 소요된다. 디지털 데이터는 점점 데이터라고도 하며 선로의 고장 등과 같이 계통의 구성과 관련된 데이 터로 이벤트 발생 즉시 SCADA로 데이터가 전달된다.

현재 신강진 전력소의 SCADA에서 관리하고 있는 UPFC RTU와 관련된 입출력 데이터를 정리하면 다음과 같다.

- 아날로그출력(조류제어) 포인트 : UPFC의 운전 지령 값에 관련된 데이터
- 아날로그입력(측정) 포인트 : UPFC가 운전되고 있는 상태와 관련된 데이터
- 디지털입력(감시) 포인트 : Inverter의 기동상태, 변압기의 상태, 밸브나 릴레이의 상태 등 실제 기기의 상태에 관련된 데이터로 실제적인 기기의 제약 상황이 발생할 경우 이를 UPFC RTU로부터 즉각적으로 입력 받는다.
- 디지털 입력/출력(감시/제어) 포인트 : 직,병렬 Inverter의 트립 상태를 감시하거나, STATCOM, SSSC, UPFC 동작을 선택하고 각 구성에서 제어 모드를 선택하여 UPFC RTU로 이 결과를 전송한다.

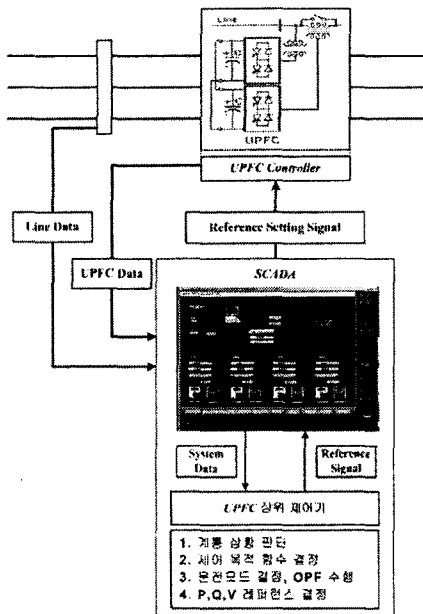


그림1. 상위제어기의 구조

2.2 정상상태 UPFC 운전 알고리즘 도출

정상상태시에 UPFC를 다양한 목적으로 운전할 수 있겠으나 본 논문에서는 지역계통의 손실을 절감하도록 하는 운전방법과 주변계통의 보상장치(ULTC, SC)와 협조하여 전압을 제어하는 운전방법에 대하여 다루었다.

2.1.1 손실최소화를 위한 운전

전력시스템에 UPFC를 도입하여 얻는 장점으로 사고에 대한 대처 능력의 향상과 더불어 사고 위험이 없는 평시에 송전 설비 이용률을 향상시킴으로써 발생하는 신규 투자 억제 효과와 선로 조류 제어와 모선 전압 유지로 인한 손실의 절감을 들 수 있다. 전자의 경우는 전력시스템의 계획과 관련된 장기적인 관점에서 봤을 때 발생하는 이득이 되고, 후자의 경우는 전력시스템 운영과 관련된 사항으로 단기적, 실제 운영적 측면에서 얻는 이익이다[2]. 지역계통의 유효전력 손실 절감을 위한 운전 전략을 도출하기 위하여 우선 각 제어변수의 변화가 전체 지역 계통의 손실에 미치는 영향을 알아보았다. 계통의 손실은 계통의 모든 선로에서의 손실의 합으로 정의되며, 선로의 손실은 선로의 양 끝 모선으로부터 유입되는 유효전력의 합이다. 따라서 계통의 총 유효전력 손실은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$LOSS = \sum_{k=1}^{NL} (P_{ij} + P_{ji}) \quad (1)$$

정상상태에서 UPFC의 제어변수는 병렬 인버터가 연결된 모선의 전압(VSET)과 직렬인버터가 삽입된 선로의 유, 무효 전력량(PDES, QDES)이다. 이 중 VSET은 병렬 인버터의 보상량과 직접적으로 연관되어 있어서, 병렬 모선 전압의 목표치를 높게 설정하면 병렬 인버터에서 무효전력 투입량이 증가하고, 따라서 계통 전체적으로 전압이 상승하는 결과가 나타난다. 따라서 병렬 모선 전압의 제어는 계통의 전압 문제 해결을 위한 협조제어의 제어변수로 이용하고, 손실 최소화를 위한 제어에는 직렬 선로의 유, 무효 전력량 제어만을 이용하도록 한다. UPFC의 유효전력 조류 제어량의 변화가 계통의 손실에 미치는 영향을 분석하기 위하여 PSS/E IPLAN을 이용하여 다음과 같은 시나리오로 반복 조류계산을 수행하도록 시뮬레이션을 수행하였다.

↓ UPFC 모델을 추가하지 않은 광주 지역계통 시뮬레이션

↑ 강진 모선의 전압 및 강진-장흥 선로의 유, 무효 전력 조류 측정

↑ 강진 UPFC 모델을 추가한 Case 시뮬레이션

이때, UPFC의 제어 변수인 PDES, QDES, VSET의 초기값은 2번 과정에서 측정된 값으로 함

↓ QDES 값을 ↑의 과정에서 초기값에서 -40MVAR ~ +40MVAR 까지 20MVAR 씩 변화시키고, 각 QDES 값에 대하여 PDES 값을 초기값에서 -40MW ~ +40MW 까지 20MW 씩 변화시켜가며 각각의 케이스에 대하여 지역계통의 총 손실을 계산

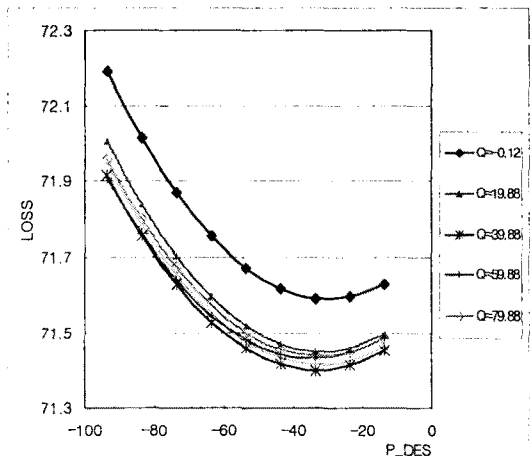


그림2. PDES 변화에 따른 계통 손실의 영향

시뮬레이션의 결과는 그림2와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 QDES값이 달라지더라도 PDES의 변화에 따른 계통의 손실은 거의 비슷한 경향으로 변화하며, 특히 QDES 값이 달라도 각각의 경우에 손실이 최소화되는 PDES 값은 모든 케이스에서 동일하게 나타남을 알 수 있다. 무효전력조류 제어변수인 QDES를 변화시켜가며 시뮬레이션한 결과도 이와 비슷하였다. 따라서 UPFC의 PDES, QDES 값을 조정하여 운전함으로써 계통의 유효전력 총 손실을 최소화할 수 있는 운전 조건이 존재하며, 각각의 변수가 계통의 손실에 미치는 영향이 서로 독립적임을 알 수 있다.

2.1.2 ULTC와의 협조를 고려한 운전

강진 UPFC 인근의 신강진 변전소에는 345 - 154kV

변압기가 있으며, 이 변압기에 ULTC가 설치, 운전되며 인근 154kV 모선의 전압을 조정하고 있다. 신강진 변전소의 ULTC는 신강진 154측 모선의 전압을 레퍼런스로 하여 동작하며, 현재는 345kV, 154kV 전압 모두를 고려하여 지역 전력소의 운전자의 판단에 의하여 수동으로 움직이고 있다. 운전자는 시간대별 전압 조정 기준에 따라 부하 상황 등을 고려하여 TAP을 조정하고 있다. 신강진 ULTC와 UPFC의 협조운전 방안을 도출하기 위하여 다음의 세가지 경우에 대하여 2007년 한전 Off-Peak 계통을 이용하여 PSS/E프로그램으로 시뮬레이션을 수행하였다.

· Case1 : UPFC를 고려하지 않고 ULTC만으로 전압 조정

· Case2 : UPFC의 전압 조정치 VSET을 강진모선의 전압 유지를 위해 제어

· Case3 : UPFC의 전압 조정치 VSET을 신강진154 모선의 전압 유지를 위해 제어

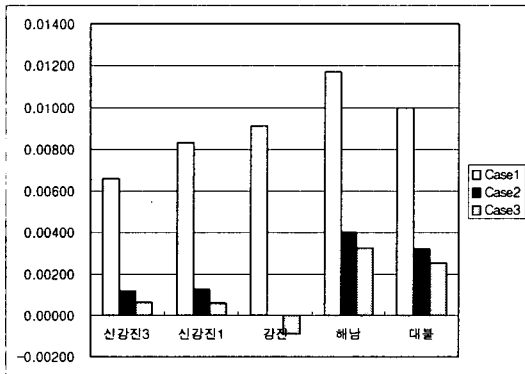


그림3. 협조 방안 도출을 위한 시뮬레이션 결과

세 가지 경우의 결과를 비교하기 위하여 UPFC의 병렬 인버터 출력이 한계인 +40MVA 이내로 유지되는 범위 내에서 강진 주변의 부하를 증가시켜가면서 주변 모선의 전압 변화량을 측정하였다. 이 결과는 그림3과 같으며, 이를 분석해 보면 UPFC의 동작을 고려하지 않은 Case1에 비하여 Case2, Case3의 경우에 전압 변화량이 10~35% 수준으로 감소함을 알 수 있다. 또한, 강진 모선의 전압을 일정하게 유지하기 위하여 VSET을 고정한 Case2에 비하여 신강진154 모선의 전압을 일정하게 유지하도록 VSET을 조정해준 Case3의 경우에 각 모선의 전압 변화율이 약 7~10% 정도 더 감소함을 알 수 있다. 이처럼 Case3의 경우에 주변 모선의 전압 변화량이 Case2에 비하여 더 작은 것은 대불, 해남 모선이 신강진 1 모선과 연결되어 있어서 강진 모선의 전압보다 신강진 1 모선의 전압 변화에 더 민감하기 때문이다. 따라서 UPFC의 VSET을 신강진1 모선의 전압을 일정한 값으로 유지하도록 제어함으로써 신강진 모선의 전압제어 뿐만 아니라 주변 154모선의 전압제어 효과도 더욱 향상되기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

이상의 결과를 통하여 UPFC 병렬측 인버터의 운전 지령치인 VSET을 신강진 154측 전압을 일정 값(또는 일정 범위 이내)로 유지하도록 제어함으로써 신강진 345 : 154 변압기 ULTC의 동작 회수를 감소시키고 인근 154모선의 전압도 유지할 수 있음을 알 수 있다[3]. 이와 같이 UPFC를 제어하는 것은 ULTC에 어떤 동작 지령을 내리는 것이 아니라 UPFC의 동작을 통해 신강진 154측 전압을 일정 범위 이내로 제어함으로써 ULTC의 동작 회수를 줄이는 것이다. 이때에 UPFC의 용량을 고려하여, UPFC의 병렬측 인버터의 출력 Q_{SHUNT} 가 특정 범위 Q_{LIMIT} ($|Q_{LIMIT}| \leq 40$) 이내 에서는 신강진154 모선 전압 유지를 위해 VSET을 제어하고, 이 범위를

벗어나는 경우에는 $Q_{SHUNT} = Q_{LIMIT}$ 이 되도록 VSET을 설정하여 UPFC의 운전 여유를 확보하도록 해야 한다. 이를 식으로 나타내면 VSET을 다음 식 (2)와 같이 결정할 수 있다. 여기에서 S_V 는 VSET의 변화에 대한 신강진154 모선의 전압의 변화율의 역수로 오프라인 계통 해석을 통하여 약 1.3 정도의 값을 갖는 것을 확인하였다.

$$VSET = \begin{cases} VSET - S_V \cdot (V_{SK14} - V_{SK14ref}) \\ \dots Q_{SHUNT} \leq Q_{LIMIT} \\ VSET, Q_{SHUNT} = Q_{LIMIT} \\ \dots Q_{SHUNT} > Q_{LIMIT} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_V = \frac{\Delta VSET}{\Delta V_{SK14}} \approx 1.3 \quad (3)$$

이와 같은 협조운전의 개념을 그림4와 같이 나타낼 수 있다.

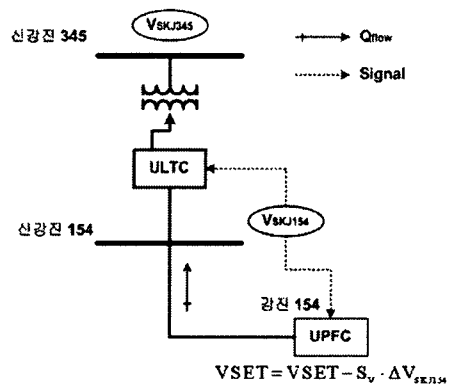


그림4. UPFC, ULTC 협조운전 개념

3. 결 론

본 논문에서는 현재 강진 변전소에 설치되어 운전되고 있는 UPFC Pilot Plant를 계통의 상황에 따라 최적의 운전목적으로 자동운전하기 위한 상위 제어 시스템의 구조 및 기능을 제안하고, SCADA와 UPFC RTU간의 입출력 데이터를 조사하였다. 또한 정상상태에서 UPFC의 운전목적으로 첫째, 지역계통의 손실 최소화 둘째, 주변 모선의 전압보상 장치와 UPFC의 협조운전을 제안하고 PSS/E 시뮬레이션 결과를 통하여 이를 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 전영수, 윤종수, 김수열, "80MVA UPFC 설치 및 시험", 전기의 세계, Vol.52, NO.7, pp. 35~41, 2003
- [2] 임정욱, "다양한 전력 시스템 운용 조건에 적합한 UPFC 운전법에 관한 연구", 서울대학교 박사학위 논문, pp.55, 2002
- [3] J. Paserba 외, "Coordination of a distribution level continuously controlled compensation device with existing substation equipment for long term var management", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.2, pp. 1034~1040, 1994