

UPFC 설치에 따른 거리계전기 영향분석

최종운*, 한영성*, 이화성*, 장병훈**, 윤종수**
 *(주)효성, **전력연구원

Analysis of Effects on Existing Distance Relays due to UPFC Installation

Jongyun Choi*, Youngseong Han*, Haksung Lee*, Byunghoon Chang**, Jongsu Yoon**
 *Hyosung Co., **KEPRI

Abstract - FACTS 기기의 하나인 UPFC는 송전선로에 직렬로 전압을 주입하는 기기로서 송전선로의 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어할 수 있다. 하지만 송전선로에 설치되어 있는 거리계전기의 입장에서 보면 UPFC가 전압을 직렬로 주입함에 따라 선로의 임피던스가 변하는 것처럼 보일 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 전남 강진변전소에 설치될 UPFC의 EMTDC 모델을 이용하여 정상상태에서의 UPFC의 운전조건에 따른 임피던스 변화량을 살펴보고, UPFC 주변계통에서 사고가 발생한 경우 UPFC의 보호회로 동작과 계전기에서 바라보는 임피던스의 변화량을 확인하여 거리계전기의 오동작 가능성과 셋팅치 정정여부를 살펴보았다.

1. 서 론

UPFC(Unified Power Flow Controller)는 전압보상과 전력조류제어를 동시에 수행할 수 있는 FACTS(Flexible AC Transmission System)기기로서, 병렬 FACTS 기기인 STATCOM과 직렬기기인 SSSC의 기능과 구조를 결합시킨 시스템이다. 현재 국내 계통에는 그림 1과 같이 강진 S/S에 80MVA UPFC(병렬인버터 40MVA, 직렬인버터 40MVA)가 최초로 설치되고 있으며, 2003년 상용운전이 개시될 예정이다.

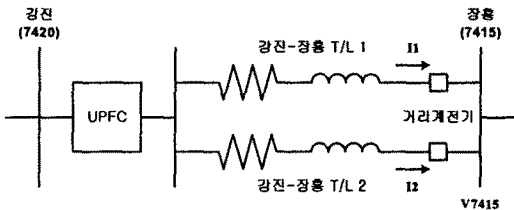


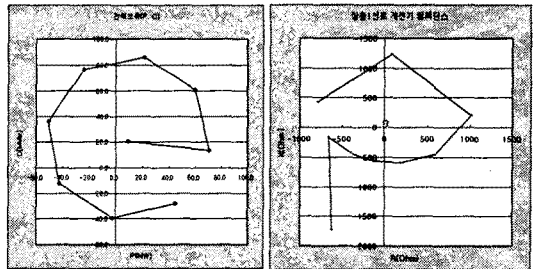
그림 1. 강진-장홍간 계통도

일반적인 거리계전기는 인근 모선에서 사고가 발생하면 모선전압과 사고전류를 바탕으로 임피던스를 계산하여 사고지점까지의 거리를 산출해낸다. 그 거리가 Zone1, Zone2, Zone3로 지정된 거리내에 위치하는 경우 각각의 Trip 시간에 따라 계전기를 동작시켜 사고를 제거하게 된다. 하지만 그림 1과 같이 강진-장홍간 T/L에 UPFC가 설치되어있는 경우, 장홍S/S의 강진-장홍T/L에 설치된 거리계전기가 바라보는 임피던스는 UPFC가 포함되어 있어, UPFC의 운전조건에 따라서 그 임피던스의 값이 달라질 수 있다. 그러므로 강진 주변계통과 UPFC의 동작특성을 모델화한 EMTDC 모델을 사용하여 정상상태에서의 UPFC의 운전에 따른 임피던스의 변화량을 살펴보고, 사고 발생시 UPFC의 Bypass에 따른 보호동작과 임피던스의 연관관계를 살펴보고, 또한 Bypass가 동작하지 않는 사고의 경우 임피던스의 변화량을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 정상상태에서의 임피던스 변화

정상상태에서 UPFC 운전에 따른 장홍S/S, 강진-장홍 T/L의 거리계전기에서 바라보는 임피던스의 변화를 확인하기 위하여 UPFC Series 인버터에서 최대전압을 주입하고 있는 상태에서의 임피던스값을 계산하였다.



a) 전력조류제어범위 b) 강진-장홍T/L1 임피던스
 그림 2. 정상상태에서의 임피던스 변화량

그 결과를 살펴보면 UPFC의 전력조류제어(그림 2-a)에 따른 선로 임피던스의 변화가 그림 2-b)에 나타나 있다. 중심부에 작은 점으로 표시된 부분이 거리계전기가 동작하는 임피던스의 범위이며, UPFC의 전압주입에 따른 임피던스의 크기가 거리계전기를 동작시키는 범위에서 크게 벗어나 있다. 그러므로 정상상태로 운전하고 있을 경우, UPFC가 어떠한 동작조건을 가지고 운전하여도 거리계전기의 오동작을 일으키지는 않을 것으로 보인다.

2.2 UPFC 보호회로

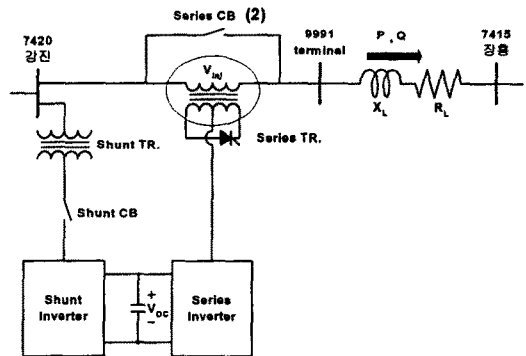


그림 3. UPFC 시스템의 개요

그림 3은 UPFC 시스템을 개략적으로 그린 그림이며, 계통사고시 송전선로에 흐르는 사고전류로부터

UPFC를 보호하기 위해서는 전력계통과 직렬인버터를 분리해야 한다. 이를 위해서 UPFC는 직렬차단기와 Thyristor Bypass 스위치를 갖추고 있다. 직렬차단기는 직렬인버터부가 동작하지 않는 경우 항상 닫혀있다. 직렬인버터가 동작할 때에는 직렬차단기가 열려 직렬변압기를 통해 직렬인버터 전압이 선로에 주입된다. 사고로 인한 과전류가 발생하면 직렬차단기는 인버터보호를 위해 닫히지만 차단기가 기계적 스위치이므로 그 속도가 느려 차단되기까지의 시간동안 사고전류가 인버터에 악영향을 줄 수 있다. 그러므로 동작속도가 빠른 전자스위치인 Thyristor Bypass 스위치를 이용하여 직렬차단기가 동작할 때까지의 시간동안 사고전류가 인버터쪽으로 흐르지 않게 해준다. Bypass 스위치는 직렬변압기 2차측에 위치하며 제어시스템에서 발생시키는 게이팅 신호를 통해 On/Off 된다.

2.2.1 계통사고시 UPFC 보호 Sequence

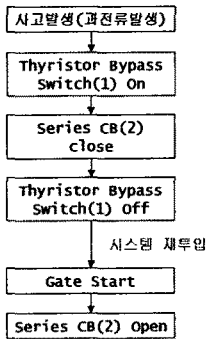


그림 4. 사고시 보호동작 Sequence

그림 4에는 사고발생시 UPFC의 보호회로 동작순서를 나타내었다. 그림에서 보듯이 계통사고시 과전류가 발생하면 보호회로에서 과전류를 감지하는 즉시 직렬차단기와 Thyristor Bypass 스위치를 닫는다. 하지만 직렬차단기는 기계적인 스위치이므로 차단까지는 약 9-Cycle의 시간이 걸리는 반면, Thyristor Bypass 스위치는 90 μ sec만에 On되므로 Thyristor Bypass 스위치가 먼저 닫히게 된다. Thyristor Bypass 스위치가 On됨과 동시에 직렬인버터는 게이팅을 정지하고, 직렬차단기가 닫힌후 변압기의 충전된 전류가 완전히 방전되면 Thyristor Bypass 스위치는 Off된다. 시스템이 다시 복구되면 UPFC는 재투입된다.

2.2.2 임피던스의 변화

강진(7420)-장흥(7415)간의 선로 임피던스는 2회선을 고려하여 다음과 같은 값을 갖는다.

$$R_L = 0.38183 (\Omega), X_L = 3.00837 (\Omega)$$

앞에서 설명한 보호회로 동작시 선로임피던스 변화를 살펴보면, 직렬차단기는 열려있고 Bypass 스위치만 On되어 있는 약 9 cycle의 기간동안에는 변압기의 누설리액턴스 만큼의 임피던스가 선로에 직렬로 추가된다.

$$X_{leakage} = 0.30307 (\Omega)$$

그러므로 이 기간동안 선로 임피던스는 약 10% 정도의 상승되며, 직렬차단기가 닫히면 순수한 선로 임피던스만 남게 된다.

2.3 UPFC 사고 시뮬레이션

앞에서 살펴보았듯이 UPFC 인근모선에서 사고가 발

생한 경우 UPFC의 Bypass동작이 정상적으로 이루어진다면, 거리계전기에 미치는 영향은 거의 없다고 보아도 무방하다. 하지만 UPFC의 운전조건에 따라서 사고가 발생한 때, UPFC의 Bypass가 동작하지 않는 경우가 발생할 수도 있다. 그러므로 UPFC EMTDC 모델을 사용하여 인근모선에 사고를 시뮬레이션하여 UPFC의 Bypass동작을 확인하였다.

2.3.1 시뮬레이션 과정 및 결과

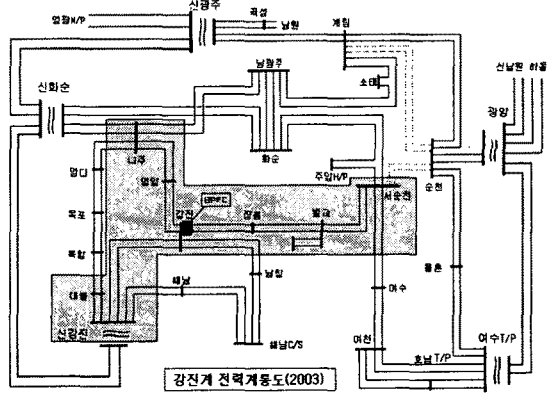


그림 5. 강진계 전력계통도

시뮬레이션은 정상상태에서 가장 큰 임피던스를 가지는 Case 2가지를 선정하였고, 사고 지점은 그림 5에 진하게 표시된 Zone 1(강진, 장흥), Zone 2(신강진, 영암, 벌교), Zone 3(대불, 나주, 서순천)에서 사고를 발생시켰고, 각 사고는 단상지락사고와 3상단락사고를 모의하였다. 또한 모든 사고의 지속시간은 0.1초로 하였다.

표 1. 사고시뮬레이션 결과표(case 1)

사고 위치	단상지락		3상단락	
	Shunt	Series	Shunt	Series
강진	저전압, 과전류 Trip	과전류 Bypass	저전압, 과전류 Trip	과전류 Bypass
장흥	과전류 Trip	과전류 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
신강진	저전압, 과전류 Trip	과전류 Bypass	저전압, 과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
영암	과전류 Trip	Shunt Trip에 의한 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
벌교	과전류 Trip	과전류 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
대불	과전류 Trip	과전류 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
나주	과전류 Trip	Shunt Trip에 의한 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	Shunt gate-stop에 의한 gate-stop 후 정상동작
서순천	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass

a. case 1

각 인버터의 운전모드와 제어 지령치는 다음과 같다.

- 병렬인버터 - 운전모드 : Iq 제어모드
Iqref = 0
- 직렬인버터 - 운전모드 : PQ 제어모드
Pref = 1, Qref = 1

b. Case 2

각 인버터의 운전모드와 제어 지령치는 다음과 같다.

- 병렬인버터 - 운전모드 : Iq 제어모드
Iqref = 0
- 직렬인버터 - 운전모드 : PQ 제어모드
Pref = -1, Qref = -1

표 2. 사고시물레이션 결과표(case 2)

사고 위치	단상지락		3상단락	
	Shunt	Series	Shunt	Series
강진	저전압, 과전류 Trip	과전류 Bypass	저전압, 과전류 Trip	과전류 Bypass
장흥	과전류 Trip	과전류 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
신강진	저전압, 과전류 Trip	과전류 Bypass	저전압, 과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
영암	과전류 Trip	과전류 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
별교	과전류 Trip	과전류 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
대발	과전류 Trip	과전류 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass
나주	과전류 Trip	Shunt Trip에 의한 Bypass	과전류 gate-stop후 정상복구	Shunt gate-stop에 의한 gate-stop 후 정상동작
서순천	과전류 gate-stop후 정상복구	과전류 Bypass	정상동작	과전류 Bypass

두 Case에 대한 시물레이션의 결과를 살펴보면, 나주를 제외한 모든 곳에서 사고가 발생시 선로 과전류에 의해 즉각적으로 직렬 Bypass가 동작하고 있다. 그러므로 나주를 제외한 지역에서 사고가 발생하면 즉시 Bypass가 동작하여 거리계전기의 임피던스에는 영향을 미치지 않을 것으로 보인다. 하지만 나주에서 사고가 발생한 경우 강진-장흥간 선로에 흐르는 과도전류의 크기가 Bypass 회로가 동작할 만큼 흐르지 않아 Bypass 회로는 동작하지 않았다. 그러므로 나주에서 사고가 났을 때, Zone1과 Zone2의 거리계전기가 동작하지 않은 경우 강진-장흥간의 Zone3 거리계전기가 동작해야 하나 정상적으로 동작을 하지 않을 가능성이 있음을 보인다. 따라서 나주의 사고에 대해서는 더 상세한 시물레이션을 수행하여 거리계전기의 영향을 검토하였다.

2.4 나주 3상단락 사고시 임피던스 변화량

EMTDC 사고시물레이션에서 UPFC의 Bypass 스위치의 동작이 발생하지 않을 가능성을 보인 나주에서의 3상단락사고시 장흥 S/S에 설치된 거리계전기에서 바라보는 임피던스의 변화량을 계산하였다. 임피던스는 장흥단의 전압(V7415)과 각 선로의 전류(I1, I2)를 기준으로 계산하였고, 이때 UPFC는 Bypass가 동작하지 않고 계속 운전하는 것을 전제로 하였다. UPFC의 Shunt 인버터는 Iq 제어모드에서 동작하고, Series 인버터는 전압주입모드와 P,Q 제어모드에서 각각 수행하였다.

나주 3상 단락사고시 UPFC가 없을 때, 계전기에서 바라보는 임피던스는 다음과 같다.

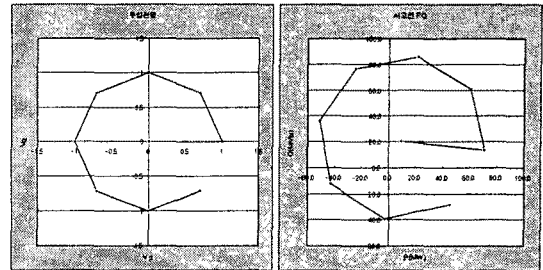
$$R1 = 15.9 \Omega, X1 = 104.2 \Omega$$

$$R2 = 15.9 \Omega, X1 = 104.2 \Omega$$

2.4.1 전압주입모드

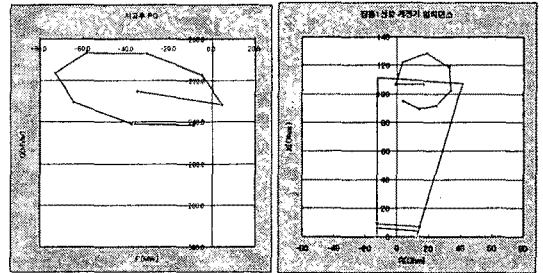
전압주입모드에서는 UPFC의 Series 인버터가 최대

전압을 주입하고 있는 상태에서의 전력조류값(Ppre, Qpre)과 영암이나 나주 bus에서 3상 단락사고를 발생시켰을 때의 전력조류값(Pafter, Qafter), 그리고 그때 강진-장흥 T/L #1,2의 거리계전기가 바라보는 임피던스값(R1, X1)을 그림 6에 나타내었다.



a) 주입전압

b) 사고전 P, Q

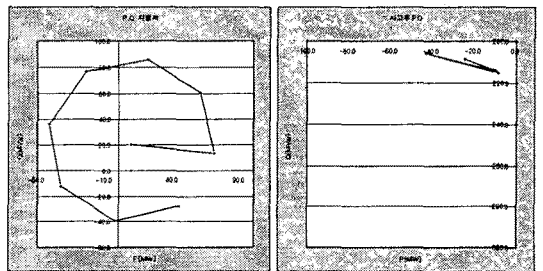


c) 사고후 P, Q

d) 강진-장흥T/L-1 임피던스
그림 6. 임피던스변화 그래프(전압주입모드)

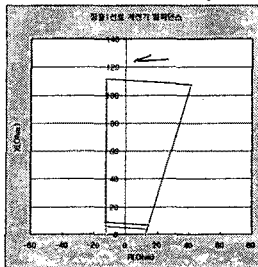
2.4.2 P,Q 제어모드

P,Q 제어모드에서는 UPFC가 최대 제어가 가능한 전력조류 지령치(Pref, Qref)로 운전하고 있는 상태에서 영암이나 나주 bus에서 3상 단락사고를 발생시켰을 때의 전력조류값(Pafter, Qafter), 그리고 그때 강진-장흥 T/L #1,2의 거리계전기가 바라보는 임피던스값(R1, X1)을 그림 7에 나타내었다.



a) 사고전 P, Q

b) 사고후 P, Q



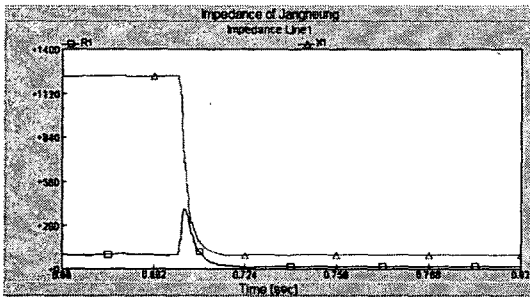
c) 강진-장흥T/L-1 임피던스

그림 7. 임피던스변화 그래프(P,Q 제어모드)

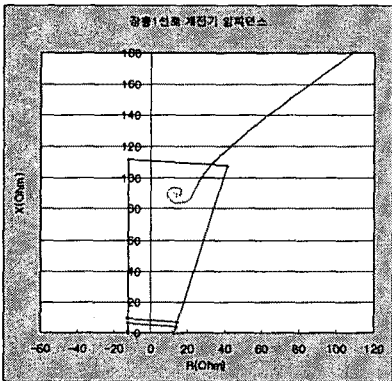
그림 6과 그림 7의 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 나주의 3상 단락사고시 UPFC의 Bypass 스위치가 동작하지 않은 경우, 장흥S/S 강진-장흥 T/L의 거리계전기에서 보는 임피던스의 크기는 UPFC의 동작조건에 따라 변함을 알 수 있다. 특히 전압주입모드로 운전중일 때는 Bypass된 경우에 비해서 최대 약 10% 내외의 임피던스 변화를 보이고 있다. 반면 P,Q 제어모드로 운전중일 때는 사고발생시 P,Q 지령치에 따라 전압을 주입하므로 많은 경우에서 비슷한 주입전압을 갖게된다. 그러므로 전압주입모드에 비해서 비교적 임피던스의 변화가 크지 않았다. 위의 결과를 보면 UPFC의 운전조건에서 임피던스의 크기가 심각한 수준으로 변화하지 않으므로 전혀 예상하지 못한 계전기의 이상동작은 발생하지 않을 것으로 예상되며, 약간의 계전기 셋팅치 변경이 필요한 것으로 보인다.

2.5 과도상태시 임피던스 변화

UPFC가 정상상태에서 운전하는 상황에서 나주에 3상 단락사고가 발생한 경우 과도상태에서 장흥측 거리계전기가 바라보는 임피던스의 변화를 관찰하여 사고가 발생한 직후 과도상태에서 UPFC의 운전에 의해 장흥측 거리계전기가 바라보는 임피던스가 비정상적으로 작아져 Zone1이나 Zone2 보호영역내의 값을 가져 계전기가 오동작할 가능성이 있는지를 확인하였다.



a) 임피던스 변화



b) 임피던스 궤적

그림 8. 과도상태에서의 임피던스 변화량

그림 8은 전압주입모드에서 $V_d=0$, $V_q=-1$ 로 운전중일 때 나주에서 3상 단락 사고가 발생한 경우 장흥측 거리계전기의 임피던스 변화를 나타내고 있다. 그림 8-b)의 임피던스 궤적을 보면 약 3 Cycle(50ms) 이내에 안정화 되며, 과도기간동안 큰 임피던스에서 장흥계전기의 Zone3 보호영역 내부로 급격히 감소하고 있다. 하지만 임피던스의 변화가 심하게 진동하지는 않으며, 과도기간동안 임피던스 궤적이 장흥 S/S 거리계전기의

Zone1이나 Zone2 보호영역에 들어가지 않음을 보이고 있다. 그러므로 나주에서 사고가 발생한 경우, 과도상태에서 장흥측 거리계전기가 Zone1이나 Zone2 사고로 오인하여 계전기 오동작을 일으킬 가능성은 없다.

3. 결 론

이상에서 UPFC의 전압주입에 따른 장흥S/S의 거리계전기의 영향을 검토하였다. 검토결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 정상상태에서는 UPFC 제어조건에 상관없이 거리계전기는 동작하지 않는다.
- 2) 거리계전기가 감지하는 대부분의 사고에서 UPFC는 파전류로 인해 Thyristor Bypass되므로, 거리계전기의 동작 특성에는 큰 영향을 미치지 않는다. 단 순시로 동작하는 Zone1에 대해서는 직렬변압기의 누설리액턴스 만큼 셋팅치를 정정해 주어야 한다.
- 3) 파전류로 Bypass가 되지 않는 사고인 나주 3상 단락 사고의 경우, UPFC의 운전조건에 따라 장흥S/S 거리계전기에서 바라보는 임피던스가 변화하므로 계전기의 Zone3 셋팅치를 이에 맞춰 정정하여야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 윤종수, 장병훈, 추진부, 한영성, 유일도, "EMTDC 80MVA UPFC (Unified Power Flow Controller) 해석모델 개발," 2001년 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp.162-165, 2001
- [2] 한병문, 백승택, 문승일, 이학성, 유일도, "EMTDC를 이용한 UPFC의 스위칭 레벨 시뮬레이션 모형 개발," 2001년 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp. 15-18, 2001
- [3] 정창호, 김진오, "UPFC가 설치된 선로에서 거리계전기의 동작특성에 관한 연구," 2001년 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp.296-298, 2001
- [4] P. K. Dash, A. K. Pradhan, "Adaptive Relay Setting for Flexible AC Transmission Systems (FACTS)," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 1, pp.38-43, 2000
- [5] K. R. Padiyar, "Control Design and Simulation of Unified Power Flow Controller," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 4, 1998