

UPFC가 연계된 강진-장흥 송전선로 보호용 거리계전기의 동작특성에 관한 연구

이승혁* · 정창호* · 김진오* · 정현수**
 한양대학교 전기공학과* · 삼원전력**

A Study on Operation Zone of Adaptive Distance Relay on Transmission Line Connected UPFC Between Kangjin and Jangheung

Seung-Hyuk Lee* · Chang-Ho Jung* · Jin-O Kim* · Hyun-Soo Jung**
 Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University* · Samwon Electric Power Industry**

Abstract - This paper presents an apparent impedance calculation procedure for distance relaying of transmission line involving FACTS(Flexible AC Transmission System) devices, particularly the UPFC (Unified Power Flow Controller), between Kangjin and Jangheung in Korea. With the changes of UPFC's parameters, the measurement and protective range (trip boundaries) of the adaptive distance relay can also be changed. So, it is the most important part in the field of system protection to analyze the operating characteristic of relaying system. The presence of UPFC significantly affects the trip boundaries which are also adversely affected by fault resistance combined with remote end infeed. This paper presents the apparent impedance calculations and the distance relay setting characteristics for faults involving the UPFC in the KEPCO system.

보상하는 전압 위상각이다. 따라서 V_{D0} 의 크기와 위상 모두를 제어하는 경우 무효전력은 물론 유효전력까지 제어 가능하며 실제로 V_{D0} 의 제어범위는 $0^\circ \sim 360^\circ$ 까지 제어가 가능하다 [2].

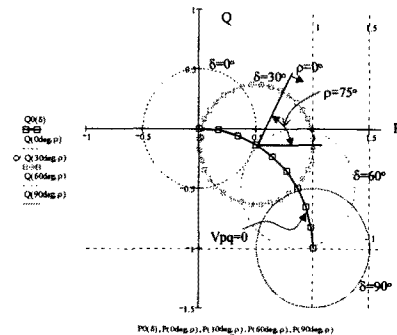


그림 1. UPFC의 운전가능 범위

1. 서 론

그림 2는 강진에 설치된 병렬 인버터 용량 40 [MVA], 직렬 인버터 40 [MVA]로 구성된 UPFC의 단선도이다. 강진에 설치된 UPFC는 운영방식에 있어 5가지의 운전 모드를 가지고 선택적으로 운전이 가능하다 [3].

UPFC는 전력 송전능력과 전력 계통의 안정도를 높이는 효과를 지닌 반면 전력 계통의 보호 측면에서는 특히, 송전선로 보호문제에 있어 새로운 문제를 야기했다. FACTS 기기를 위한 제어회로의 향상은 계전기의 보호 지역(Protection Zone)의 선택 및 정정에 있어 임피던스, 위상각, 전압의 크기, 부하전류의 변화와 사고에 의해 야기되는 과도상태 등의 새로운 전력계통의 동적 문제를 발생시켰다[1]. 특히, 송전선로에서 후비보호로 가장 많이 사용되는 거리계전기(Adaptive Distance Relay)는 모선의 전압과 전류만으로 고장구간을 판별하여 동작하기 때문에 전력계통의 영향을 가장 많이 받는 계전기이다. 따라서, 거리계전기는 설치 전 계통 상황을 정확하게 예측하여 계전기의 정정에 반영하여야 오동작과 부동작을 방지할 수 있다. 계통의 영향으로는 역률과 부하 임피던스, 그리고 고장저항 등을 들 수 있으며 특히, 송전선로에 UPFC와 같은 보상기가 설치된 경우 계통의 영향을 많이 받는 거리계전기의 입장에서 충분한 동작특성에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

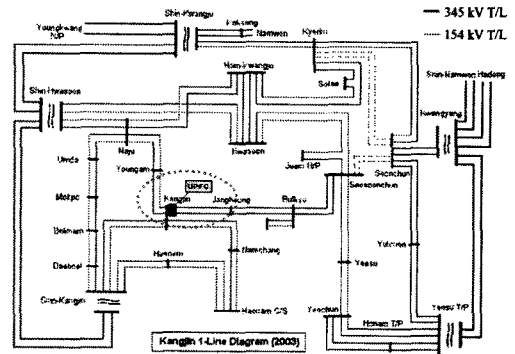


그림 2. 강진에 설치된 UPFC 단선도

따라서 본 논문은 UPFC가 설치된 장흥-강진간 송전선로에 대해 UPFC의 동작에 따라 기존의 거리계전기가 어떠한 특성을 가지고 동작할 것인가를 연구하여 보호협조에 반영하는 참고자료의 역할을 할 것이다.

- 모선 전압 제어 모드(Bus Voltage Control Mode)
- 병렬 무효전력 제어 모드(Var Control Mode)
- 직렬 전압 주입 모드
- 직·병렬 전압 주입 모드
- 유·무효전력 제어 모드

2. 시스템 모델

2.1. UPFC 모델

UPFC가 보상하는 보상전압 V_{D0} 의 크기와 위상에 따라 운전범위를 그림으로 표현하면 그림 1과 같다. 그림 1에서 δ 는 양 모선간의 전압위상차이며 ρ 는 UPFC가

일반적으로 거리계전기는 인근 모선에서 사고가 발생하면 전압과 사고전류를 바탕으로 임피던스를 계산하여 사고 지점까지의 거리를 산출해낸다.

본 논문에서는 UPFC의 동작모드 중 전압보상에 관

련한 모드만을 고려하여 거리계전기가 바라보는 임피던스를 계산하였다.

3. UPFC가 연계 된 강진-장흥간 송전선로의 임피던스 계산

그림 3과 같이 강진-장흥 T/L에 설치된 거리계전기가 바라보는 임피던스는 UPFC의 운전에 따라서 임피던스의 값이 달라질 수 있다. 그러므로 UPFC에 의한 임피던스의 변화량을 살펴보고, 사고발생시 UPFC의 인버터 보호목적으로 사용된 바이패스(Bypass)회로에 따른 보호동작과 임피던스의 연관관계를 살펴보았다. 또한 바이패스 회로가 동작되지 않을 경우의 임피던스의 변화에 대해 확인하였다. 또한 강진-장흥간 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

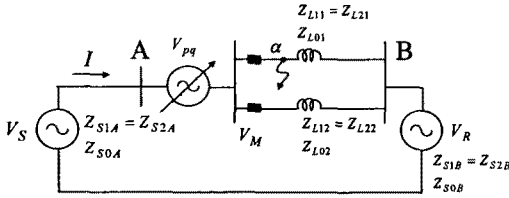


그림 3. 장흥-강진간 계통도

표 1. 강진-장흥간 system parameter

Z_{0A}	1.7431+j19.424 [Ω]
Z_{0A}	2.6147+j29.886 [Ω]
Z_{0B}	1.7431+j19.424 [Ω]
Z_{0B}	2.6147+j29.886 [Ω]
Z_{L1}	0.03818+j0.3312 [Ω /km]
Z_{L0}	0.1064+j0.8670 [Ω /km]
α (보호거리)	0.95 (95 %)
R_F (고장저항)	0 ~ 200 [Ω]
송전선로 길이	20 [km]

3.1. UPFC의 Bypass 회로가 동작했을 경우

지락사고시 UPFC RTC(Real Time Control) 보드의 바이패스 회로가 정상 동작할 경우는 선로임피던스와 직렬보상기에 연결된 변압기의 누설리액턴스만을 고려하면 되므로 다음과 같은 수학적 접근 방법에 의해 동작특성을 살펴볼 수 있다. 그림 4에서 계전기의 Zone 1과 Zone 2는 강진-장흥간 선로에 기존에 설치된 거리계전기의 Trip Boundary의 Setting 값이다. UPFC가 설치된 강진-장흥간 2 회선 중 한 회선의 1선 지락사고시의 임피던스의 변화는 기존의 Setting 된 Trip Boundary를 벗어나서 Over-reach하고 있으므로 최적의 거리계전기 정정치는 사고 임피던스에 계산 [2]에 의해 Optimal Zone 1과 Optimal Zone 2처럼 되게 된다.

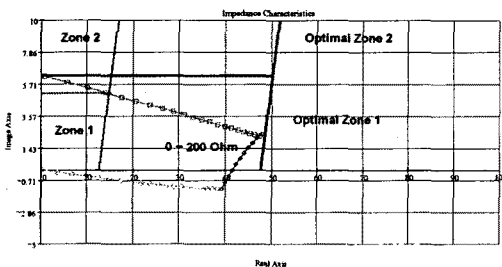


그림 4. 강진-장흥간 1상 지락사고의 거리계전기의 동작범위

3.2. UPFC의 Bypass 회로가 동작하지 않은 경우

UPFC의 바이패스 회로가 동작되지 않는다면 사고시에도 계속 UPFC에서 전압, 무효전력 및 유효전력이 주입될 수 있고 이러한 조건에서는 선로전압이나 부하전류가 계속적으로 변화되므로 이러한 경우의 거리계전기가 바라보는 임피던스에 대한 연구가 필요하다.

계산에 필요한 파라미터는 표 1과 동일하며 UPFC가 계전기 설치모선 앞에 있는 경우이므로 계전기 설치전의 전압은 식 (1)과 같다.

$$V_M = V_S + V_M \quad (1)$$

따라서 거리계전기가 설치되어 있는 모선과 B 모선(장흥)사이의 전압 Phasor를 나타내기 위한 관계식은 식 (2)와 같고 A(강진), B 모선(장흥)간의 전압 Phasor는 식 (3)과 같다.

$$H(h, \delta) = |h|e^{-j\delta} \quad (2)$$

$$V_R = [H(h, \delta)] V_M \quad (3)$$

여기서, 강진-장흥간의 전압차이는 UPFC가 없었을 경우 최대 0.02 [PU]가 발생한 것을 한전 EMS데이터로 알 수 있었다. 따라서 h 는 0.98 [PU], 그리고 δ 는 최대 30° 의 위상차이를 고려하므로 30° 로 하였다. 또한, 강진에서 장흥간은 3상 2회선 선로이지만 선로 임피던스가 동일하므로 2회선 중 위쪽의 송전선로에 발생한 1선 지락사고만을 고려하였다.

A 모선(강진)에서 α 만큼 떨어진 곳에서 1선 지락사고가 발생한 경우 강진과 장흥에서 바라 본 정상분, 역상분 임피던스는 식 (4)와 같다.

$$Z_{1A}(\alpha) = Z_{2A}(\alpha) = Z_{S1A} + \alpha Z_{L1} \quad (4)$$

$$Z_{1B}(\alpha) = Z_{2B}(\alpha) = Z_{S1A} + (1 - \alpha) Z_{L1}$$

송전거리에 따른 임피던스의 비에 의해 전류를 구하기 위해 $C_1(\alpha)$, $C_0(\alpha)$ 를 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$C_1(\alpha) = \frac{Z_{1B}(\alpha)}{Z_{1A}(\alpha) + Z_{1B}(\alpha)} \quad (5)$$

$$C_0(\alpha) = \frac{Z_{0B}(\alpha)}{Z_{0A}(\alpha) + Z_{0B}(\alpha)}$$

강진에서 장흥으로 흐르는 사고전의 전류는 식 (6)과 같다.

$$I_L = \frac{V_S - V_R}{Z_{1A}(\alpha) + Z_{1B}(\alpha)} \quad (6)$$

또한 사고전의 2회선 중 한 회선으로 흘러 B 모선으로 들어가는 부하전류는 식 (7)과 같다.

$$I = \frac{V_M - V_R}{Z_{1A}(\alpha) + Z_{1B}(\alpha)} \quad (7)$$

사고전의 사고지점에서의 전압은 식 (8)과 같다.

$$V_{AFD} = V_M - I \cdot Z_{1A}(\alpha) \quad (8)$$

Total Sequence Impedance는 식 (9)와 같다.

$$Z_T = \frac{2 \cdot Z_{1A}(\alpha) \cdot Z_{1B}(\alpha)}{Z_{1A}(\alpha) + Z_{1B}(\alpha)} + \frac{Z_{0A}(\alpha) \cdot Z_{0B}(\alpha)}{Z_{0A}(\alpha) + Z_{0B}(\alpha)} \quad (9)$$

정상분, 역상분, 그리고 영상분 전류는 모두 동일하며 그 크기는 식 (10)과 같다.

$$I_{1F} = \frac{V_{AFD}}{Z_T + 3R_F}$$

$$I_{1A} = \frac{C_1(\alpha) \cdot V_{AFD}}{Z_T + 3R_F} \quad (10)$$

$$I_{0A} = \frac{C_0(\alpha) \cdot V_{AFD}}{Z_T + 3R_F}$$

결국 총 고장전류와 고장전압은 식 (11)과 식 (12)와 같다.

$$I_{AB} = I + 2I_{1A} + I_{0A} \quad (11)$$

$$V_{AB} = (3I_{1F}) \cdot R_F + (I + I_{1A}) \cdot Z_{L1}(\alpha) + I_{2A} \cdot Z_{L1}(\alpha) + I_{0A} \cdot Z_{L0}(\alpha) \quad (12)$$

그러므로 A(강진) 모선 측에 설치된 거리계전기가 바라보는 임피던스는 식 (13)과 같다.

$$Z_{AB} = \frac{V_{AB}}{I_{AB} + k_n \cdot 3I_{0A}} \quad (13)$$

여기서, $k_n = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3 \cdot Z_{L1}}$ 이다.

그림 5는 강진-장홍간 모선의 위상차가 30°일 경우 UPFC의 보상전압의 크기를 0.1 [PU]~0.5 [PU]로 변화시켰을 때 변화하는 부하전류의 벡터도이다. 양 모선의 위상차가 30°일 경우 UPFC의 보상정도에 따라 부하전류의 위상이 ± 60° 까지 변화하여 거리계전기에 영향을 미치게 된다.

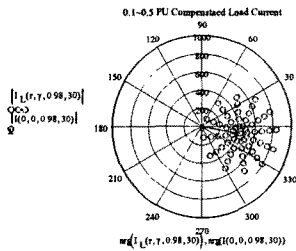


그림 5. 0.1~0.5 [PU] 보상시 부하전류

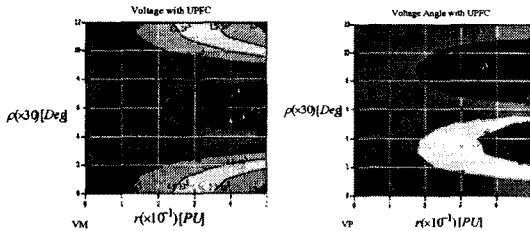


그림 6. UPFC 보상 후 전압크기와 위상

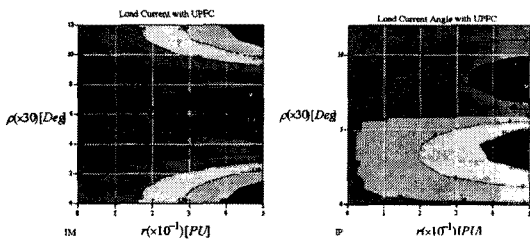


그림 7. UPFC 보상 후 전류크기와 위상

그림 6에서 알 수 있듯이 보상 후 전압의 크기는 UPFC를 0°로 운전할 경우 가장 크며 180°로 운전할 경우 가장 작다. 위상은 보상정도에 따라 약 ± 20° 정도 차이가 발생하였다. 그림 7은 UPFC 보상정도에 따라 변화하는 부하전류의 크기와 위상의 벡터도를 나타낸

것이다. 그림 1에서와 같이 강진-장홍간 모선의 위상차가 30°인 경우 UPFC는 0°로 운전하였을 경우 부하전류가 가장 크며 부하전류의 위상은 보상전압의 크기를 크게 할 경우 보상전압이 240° 부근에서 부하전류의 위상이 급격히 변화하여 거리계전기의 특성이 가장 많이 변할 가능성을 지닌 운전 범위를 알 수 있다.

그림 8, 9는 각각 UPFC의 보상전압이 0.1 [PU]와 최대인 0.5 [PU]인 경우 보상된 위상에 따른 거리계전기가 바라보는 임피던스를 계산한 것이다.

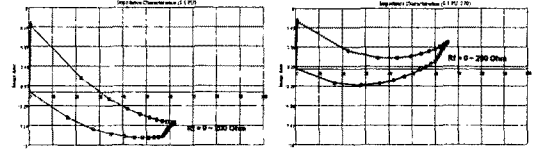


그림 8. UPFC 보상 전압크기 0.1 [PU]인 경우

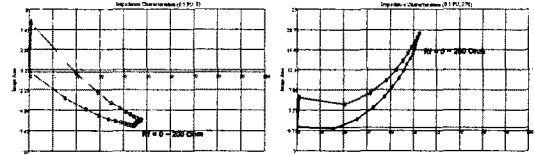


그림 9. UPFC 보상 전압크기 0.5 [PU]인 경우

4. 결 론

본 논문에서는 UPFC가 강진-장홍간 송전선로에 설치되어있는 경우 1선 지락사고시 UPFC 내부의 RTC 보드에 의한 검출로 바이패스 회로가 정상 동작될 경우와 실패할 경우에 대한 거리계전기가 바라보는 임피던스를 실패데이터로 계산하였으며, 이 두 가지 사례연구를 비교하였다. 계산 결과로 1선 지락사고시 RTC 보드에 의한 바이패스 회로가 정상 동작한 경우에는 거리계전기의 정정치를 그대로 사용해도 무관하나 RTC 보드에 의한 검출신호에도 불구하고 바이패스 회로가 동작되지 않을 경우에는 주입전압의 크기와 위상에 따라 Trip Boundary가 변화되므로 이에 대한 거리계전기의 정정치가 달라져야함을 알 수 있다.

따라서 송전선로에서 고지향 지락사고가 발생하고 UPFC의 보상전압의 크기가 클수록 거리계전기의 동작 영역의 Under-reach와 Over-reach의 범위가 확대되기 때문에 기존의 거리계전기의 정정에 이를 고려해야 할 것으로 사료된다. 이는 UPFC의 주입되는 보상전압이 클수록 확대됨을 볼 수 있다. 또한 강진-장홍간은 단거리 송전선로이기 때문에 역조류의 조짐도 보이고 있다.

본 논문의 연구로 UPFC 설치에 따른 거리계전기의 보호협조시 참고자료가 되어 오동작 및 부동작을 최소화하는데 기여했으면 한다. 향후 이러한 계전기 오동작 및 부동작 해결방안에 대해 연구할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. K. Dash, "Adaptive Relay Setting for Flexible AC Transmission System(FACTS)", *IEEE Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, 2000.
- [2] Chang-Ho Jung, Jin-O Kim, "A Study for Operation Zone of Distance Relay on Transmission Line Connected UPFC", *Proceeding of the KIEE PES autumn annual Conference*, 2001.
- [3] 최종운, 한영성, 이학성, 장병훈, 윤종수, "UPFC 설치에 따른 거리계전기의 영향분석", *대한전기학회 전력계통 연구회 추계학술대회 논문집*, 2002. 5.