

UPFC가 설치된 선로에서 거리계전기의 동작특성에 관한 연구

정창호* · 김진오
한양대학교 전기공학과

A Study for Operation Zone of Distance Relay on Transmission Line Connected UPFC

Chang-Ho Jung* · Jin-O Kim
Dept. of EE, Hanyang University

Abstract - This paper discusses the operation zone of distance relay on transmission line connected unified power flow controller(UPFC).

Depending on operating conditions of UPFC, the trip characteristics of distance relay is influenced by the pre-fault conditions.

In this paper, apparent impedance of distance relay influenced by the UPFC control of distance is calculated.

1. 서 론

FACTS기기는 현재 송전용량 증대와 전압안정 등을 목적으로 활발히 연구되고 있으며 FACTS기기중 일부는 적용되고 있거나 적용단계에 있다.

FACTS기기는 전력전자 소자를 이용한 제어방식으로 대용량의 전력전자 소자가 개발되면서 그 응용범위가 대폭 확대되고 있으며 기존의 송전선로를 추가로 증설하지 않으면서 송전용량을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라 계통의 안정도를 증대시킬 수 있어 앞으로도 다양한 FACTS기기가 개발되어 사용될 예정이다. 그러나 이러한 FACTS기기는 기존의 송전선로 보호용 계전기에 많은 영향을 줄 가능성이 있어 많은 검토가 필요하다.

특히, 송전선로에서 후비보호로 가장 많이 사용되는 거리계전기는 자단의 전압과 전류만으로 고장구간을 판별하여 동작하기 때문에 계통의 영향을 가장 많이 받는 계전기이기도 하다. 따라서 거리계전기는 설치 전 계통상황을 정확하게 예측하여 계전기 정정에 반영하여야 오동작과 부동작을 방지할 수 있다. 계통의 영향으로는 역률과 부하임피던스 그리고 고장저항 등을 들 수 있으며 특히, 선로에 UPFC와 같은 보상기기가 설치된 경우 계통의 영향을 많이 받는 거리계전기의 입장에서 충분한 동작 특성연구가 필요할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 UPFC가 송전선로에 설치되었을 경우 UPFC의 제어방식에 따라 기존의 거리계전기가 어떠한 특성을 가지고 동작할 것인가를 미리 예측하여 보호협조에 반영하거나, 기존의 거리계전기의 보호능력을 검증하는데 주력하였다.

2. UPFC의 원리와 거리계전기가 보는 임피던스

선로에 UPFC가 설치된 경우 전송 가능한 유효전력과 무효전력은 식 1과 같이 표현되며 이때 UPFC가 보상은 보상전압 V_{pq} 의 크기와 위상에 따라 운전범위를 그림으로 표현하면 그림 1과 같다. 그림 1에서 δ 는 양모선간의 전압위상차이며 ρ 는 UPFC가 보상하는 전압 위상각이다. 식 1에서 δ 가 30° 인 경우 P 가 최대가 되기 위해서는 $P(\delta, \rho)$ 의 두 번째 항의 ρ 가 75° 이며 그림 1에서도 확인할 수 있다. 따라서 V_{pq} 의 크기와 위상 모두를 제어하는 경우 무효전력은 물론 유효전력까지 제어가 가능하며 실제로 V_{pq} 의 제어범위는 $0^\circ - 360^\circ$ 까지 제어가 가능하다.

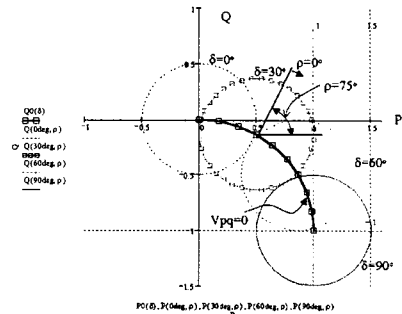


그림 1. UPFC의 운전가능 범위

$$P(\delta, \rho) = \frac{V^2}{X} \sin(\delta) - \frac{V \cdot V_{pqrms}}{X} \cos\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) \quad (1)$$

$$Q(\delta, \rho) = \frac{-V^2}{X} (1 - \cos(\delta)) - \frac{V \cdot V_{pqrms}}{X} \sin\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right)$$

그림 2(a)와 같이 UPFC가 설치된 경우 등가회로는 그림 2(b)와 같으며 A, B모선간의 전압의 Phasor의 관계를 나타내기 위해 전압 Phasor를 식 2와 같이 표현하고 A, B모선간의 전압의 관계는 식 3과 같다.

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

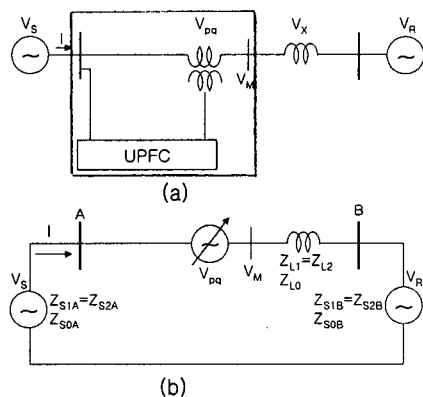


그림 2. UPFC가 연계된 선로의 등가회로

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

A모선에서 a만큼 떨어진 곳에서 1선 지락사고가 발생한 경우 A모선과 B모선에서 본 정상분, 역상분 임피던스는 식 4와 같다.

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

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

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

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

UPFC가 보상하는 Vpq는

$$V_M(r, \rho) = |V_S| \cdot r \cdot e^{j\rho} \quad (6)$$

A모선에서 B모선으로 흐르는 사고전 부하전류는

$$I(r, \rho, h, \delta) = \frac{V_S - V_R(h, \delta) + V_{FD}(r, \rho)}{Z_{1A} + Z_{1B}} \quad (7)$$

사고전 사고지점에서의 전압은

$$V_{AFD}(r, \rho, h, \delta, a) = V_S - I(r, \rho, h, \delta) \cdot Z_{1A}(a) \quad (8)$$

Total sequence impedance 는

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

Positive, Negative, Zero Sequence Current는 모두 동일하며 그 크기는

$$I_{1F}(r, \rho, h, \delta, rf) = \frac{V_{AFD}(r, \rho, h, \delta)}{Z_T(a) + 3R_F(rf)} \quad (10)$$

$$I_{1A}(r, \rho, h, \delta, a, rf) = \frac{C_1(a) \cdot V_{AFD}(r, \rho, h, \delta, a)}{Z_T(a) + 3R_F(rf)} \quad (11)$$

$$I_{0A}(r, \rho, h, \delta, a, rf) = \frac{C_0(a) \cdot V_{AFD}(r, \rho, h, \delta, a)}{Z_T(a) + 3R_F(rf)}$$

따라서 총 고장전류와 고장전압은

$$I_{AB}(r, \rho, h, \delta, a, rf) = I(r, \rho, h, \delta) + 2I_{1A}(r, \rho, h, \delta, a, rf) + I_{0A}(r, \rho, h, \delta, a, rf) \quad (12)$$

$$V_{AB}(r, \rho, h, \delta, a, rf) = (3I_{1F}(r, \rho, h, \delta, a, rf) \cdot R_F(rf) + (I(r, \rho, h, \delta) + I_{1A}(r, \rho, h, \delta, a, rf)) \cdot Z_{L1}(a) + I_{2A}(r, \rho, h, \delta, a, rf) \cdot Z_{L1}(a) + I_{0A}(r, \rho, h, \delta, a, rf) \cdot Z_{L0}(a)) \quad (13)$$

그러므로 A모선측에 설치된 계전기가 보는 임피던스는

$$Z_{AB}(r, \rho, h, \delta, a, rf) = \frac{V_{AB}(r, \rho, h, \delta, a, rf)}{I_{AB}(r, \rho, h, \delta, a, rf) + kn \cdot 3I_{0A}(r, \rho, h, \delta, a, rf)} \quad (14)$$

$$\text{여기서 } kn = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}$$

또한 B모선에 설치된 계전기의 경우도 동일하게 계산할 수 있다. 식 14에서 거리계전기가 보는 임피던스는 양모선간의 전압 Phasor(h,δ), 그리고 사고지점(a), 사고지점의 저항(rf), UPFC가 보상하는 보상전압의 Phasor(r,ρ)의 함수가 된다.

3. 사례연구

사례연구를 위해 표 1과 같은 시스템 파라미터를 설정

하였으며 154 kV의 양단전원에서 다양하게 시스템 파라미터를 변경하면서 A모선과 B모선의 양모선에 설치된 계전기가 보는 임피던스를 측정하였다.

표 1과 같은 경우 UPFC의 보상전압의 벡터도는 그림 3과 같다. UPFC의 보상전압의 크기를 0.1[pu]로 보상하는 경우 양모선의 위상차에 따라 달라지는 부하전류의 크기는 그림 4에 나타내었으며, 그림 5는 양모선의 위상차가 30°일 경우 UPFC의 보상전압의 크기를 0.1~0.5[pu]로 변화시켰을 때 변화하는 부하전류의 벡터도이다. 양모선의 위상차가 30°일 경우 UPFC의 보상정도에 따라 부하전류의 위상이 ±60°까지 변화하여 거리계전기의 영향을 미치게 된다.

표 1. 사례연구를 위한 시스템 파라미터

Z _{S1A}	0.5334 + j4.1126 [Ω]
Z _{S0A}	1.8712 + j10.0961 [Ω]
Z _{S1B}	0.5929 + j4.9798 [Ω]
Z _{S0B}	2.3598 + j11.6198 [Ω]
Z _{L1}	0.0436 + j0.3445 [Ω/km]
Z _{L0}	0.2380 + j1.0443 [Ω/km]
rf	0 ~ 100 [Ω]
Line length	100 [km]
h	0.9 ~ 1.0
δ	0 ~ 30°
a	0 ~ 100 [%]
r	0.1 ~ 0.5 [pu]
ρ	0 ~ 360°

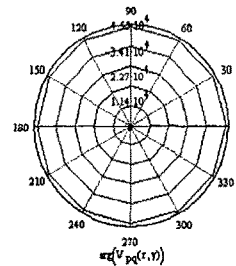


그림 3. UPFC의 보상전압(Vpq)

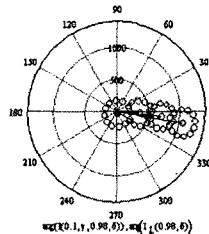


그림 4. 0.1[pu]로 보상할 경우 부하전류

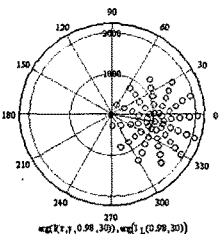


그림 5. 0.1~0.5[pu]까지 보상할 경우 부하전류

그림 6과 7은 UPFC의 보상정도에 따라 보상 후의 전압(V_M)의 벡터도를 나타낸 것이다. 보상후 전압의 크기는 UPFC를 0°로 운전할 경우 가장 크며 180°로 운전할 경우 가장 작다. 위상은 보상정도에 따라 약 ±20° 정도 차이가 발생하였다. 그림 8의 경우는 양모선의 위상차가 30°인 경우이다. 그림 8과 그림 9는 UPFC의 보상정도에 따라 부하전류의 벡터도를 나타낸 것이다. 그림 1에서 이미 확인하였듯이 양모선의 위상차가 30°인 경

우 UPFC를 약 75°로 운전하였을때 부하전류가 가장 크며 부하전류의 위상은 보상전압의 크기를 크게할 경우 보상전압이 240°부근에서 부하전류의 위상이 급격히 변화하여 거리계전기의 특성이 가장 많이 변할 가능성이 있는 운전범위임을 알 수 있다.

그림 10은 UPFC가 없는 경우의 거리계전기가 보는 임피던스를 나타낸것이며 그림 11에서 그림 14는 UPFC의 보상전압이 0.1 [pu]인 경우 보상위상에 따라 거리계전기가 보는 임피던스를 나타낸 것이다. UPFC의 보상정도에 따라 Underreach와 Overreach가 발생할 가능성이 있으며 보상전압의 크기가 큰 경우(그림 15 - 18 참조)는 고저항지락사고 일수록 Underreach와 Overreach의 범위가 확대되고 있음을 알 수 있다.

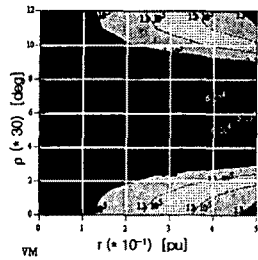


그림 6. UPFC 보상후 전압크기

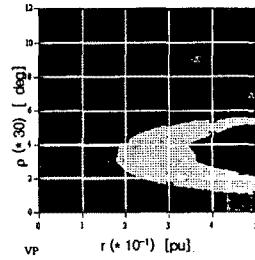


그림 7. UPFC보상후 전압위상

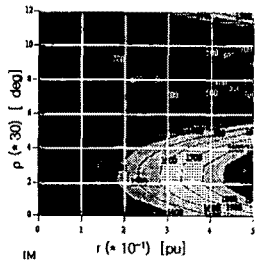


그림 8. UPFC보상시 부하전류 크기

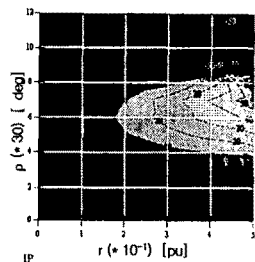


그림 9. UPFC보상시 부하전류 위상

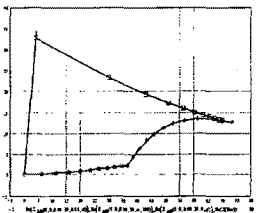


그림 10. UPFC가 없는 경우 거리계전기가 보는 임피던스

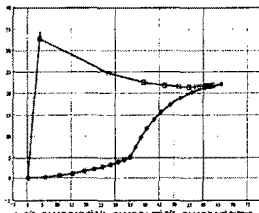


그림 11. r=0.1, ρ=0°로 UPFC를 운전할 경우

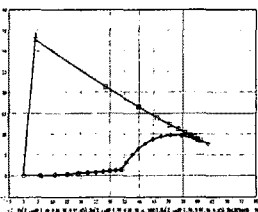


그림 12. r=0.1, ρ=90°로 UPFC를 운전할 경우

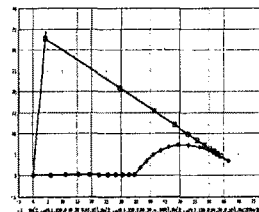


그림 13. r=0.1, ρ=120°로 UPFC를 운전할 경우

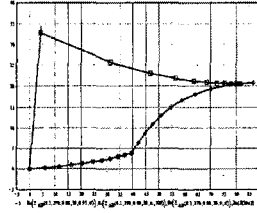


그림 14. r=0.1, ρ=270°로 UPFC를 운전할 경우

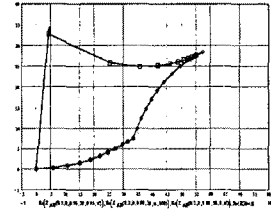


그림 15. r=0.2, ρ=0°로 UPFC를 운전할 경우

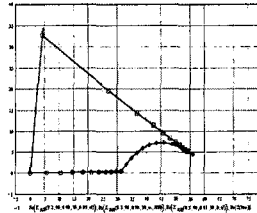


그림 16. r=0.2, ρ=90°로 UPFC를 운전할 경우

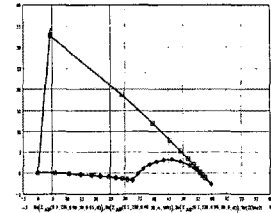


그림 17. r=0.2, ρ=120°로 UPFC를 운전할 경우

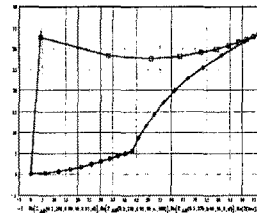


그림 18. r=0.2, ρ=270°로 UPFC를 운전할 경우

4. 결 론

본 논문에서는 UPFC가 선로에 설치되어 운전될 경우 거리계전기가 보는 임피던스를 계산하였으며 UPFC가 없는 경우와 비교하여 나타내었다. 선로에서 고저항지락사고가 발생하고 UPFC의 보상전압의 크기가 클수록 Underreach와 Overreach의 범위도 확대되기 때문에 기존의 거리계전기의 정정에 이를 고려하여 할 것으로 사료된다. 앞으로 다양한 UPFC의 설치조건에 따른 경우와 이를 고려한 알고리즘 연구를 지속할 예정이다.

(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] Hideaki Fujita, "Control and Analysis of Unified Power Flow Controller", IEEE Power Electronics, Vol. 14, No. 6, 1999.
- [3] K.R.Padiyar, "Control Design and Simulation of Unified Power Flow Controller", IEEE Power Delivery, Vol. 13, No. 4, 1998.
- [4] 정창호, 김진오, "UPFC가 연계된 선로에서 RTDS를 이용한 거리계전기의 동특성 시험에 관한 연구", 전기학회 하계학술대회, 2001. 7
- [5] Narain G. Hingorani, "Understanding FACTS", 1999.