

송전선로에 UPFC연계시 거리계전기 동작특성에 관한 연구

서정남 · 정창호 · 김진오
한양대학교 전기공학과

A Study on Distance Relay characteristics for Transmission Line with the Unified Power Flow Controller

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

Abstract - This paper represents impedance calculation of the distance relay using PSCAD/EMTDC software for transmission line involving the UPFC (Unified Power Flow Controller) device, which is the most vigorous component of FACTS. The presence of the UPFC significantly affects the line parameters of transmission system, which are also influenced by the distance relay setting. Moreover, depending on the UPFC location and its parameters, zones of setting the distance relay will be changed. The presence of the UPFC in the fault loop affects both voltage and current seen by relay. Therefore, the distance relay should be taken into account the variable injected voltage of the UPFC.

의 보상원리는 그림 1처럼 등가회로로 나타낼 수 있다. 송전선로에 전압은 $V_s + V_{se}$ 이고 선로에 흐르는 전류와 선로에 걸리는 전압은 UPFC에 의한 주입전압 V_{se} 의 크기와 위상을 변경함으로써 조정 가능하다. 결과적으로 송·수전단 사이의 위상차를 변경 가능하여 전송되는 유·무효전력의 제어가 가능하게 된다.

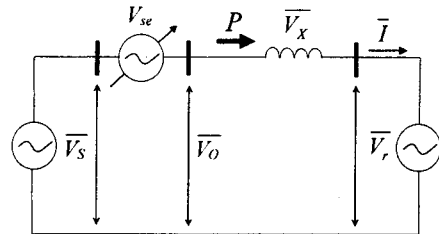


그림 1. UPFC연계된 계통 등가회로

1. 서 론

최근 급속도로 발전하는 전력전자기술과 고속·정밀 제어기술을 이용하여 송전용량의 증가 및 전력조류의 최적화를 위한 교류송전시스템으로서 FACTS(Flexible AC Transmission System)기기가 각광을 받고 있다. 그중에서도 UPFC는 선로의 전압을 임의의 크기와 위상을 갖도록 제어하여 선로로 전송되는 유·무효전력을 총체적으로 보상하는 기능을 갖을뿐만 아니라 STATCOM이나 TCSC같은 독립적 기능으로도 사용가능하기 때문에 가장 우수한 FACTS기이라 볼 수 있다. 이런 UPFC가 계통에 연계되어 운영된다면 계통의 보호분야 측면에서는 새로운 문제가 야기될 수 있는데 그 이유는 UPFC연계로 인하여 송전선로 매개변수가 변하기 때문에 계통의 영향을 많이 받는 거리계전기는 오동작과 부동작이 발생할 수 있기 때문이다. 또한 UPFC의 운전방식과 설치지점에 따라 기존의 거리계전기가 받는 영향도 다르기 때문에 계통상황을 정확히 예측하여 보호 계전기 정정에 반영을 해야 할 것이다. 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 사용하여 UPFC기기가 송전선로에 연계되었을 경우와 연계되지 않았을 경우에 기존의 거리계전기가 어떠한 특성을 나타내는가를 분석하여 보호협조에 도움을 주는 데 목적을 두고 있다.

선로리액턴스 X_L , UPFC에 의한 보상전압 V_{se} , 송전단 전압 V_s , 수전단 전압 V_r 이 포함된 간단한 송전선로의 단상등가회로에서 보면 송전선로의 리액턴스 X_L 에 걸리는 전압 V_x 는 다음 식으로 나타낸다.

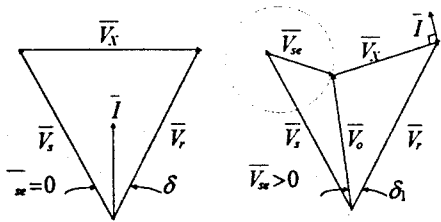
$$V_x = V_s - V_r + V_{se} = IX_L \tag{1}$$

이 식에서 송전선로 양단에 나타나는 전압 V_x 는 송전선로에 직렬로 주입되는 보상전압 V_{se} 를 조절하여 변화시킬 수 있다. 결과적으로 송전선로에서의 선전류와 전력조류를 변화게 한다. 선로에 직렬로 주입되는 전압벡터 V_{se} 는 r (보상전압의 크기)과 θ (보상전압의 위상)인 $|r|e^{-j\theta}$ 로 표현할 수 있는데 여기서 보상전압의 크기는 최대 한계치 내에서 직류링크 전압과 직렬 인버터의 변조율에 의해 결정되어지고, 보상전압의 위상은 $0 < \theta < 2\pi$ 인 범위 내에서 임의의 조정 가능하다. 그림 2a는 UPFC가 연계되지 않은 일반적인 벡터선도이다. 여기서 송전단 전압 V_s 와 수전단 전압 V_r 와는 δ 만큼의 위상차가 발생한다. 그러나 송전선로에 UPFC가 연계되면 보상전압 V_{se} 는 그림 2b에서처럼 보상이후의 전압 V_0 와 수전단 전압 V_r 와는 δ_1 의 위상차로 변하게 된다. 그 결과 선로에 흐르는 선로전류와 전력조류의 크기가 변하게 되는데 이러한 원리를 바탕으로 UPFC의 보상전압을 제어함으로써 송전선로의 유·무효전력제어가 가능하게 된다. 따라서 이런 특성을 가진 UPFC가 계통에 연계된다면 사고전 부하전류에 영향을 많이 받는 거리계전기가 오부동작할 가능성이 많아지게 되므로 연계되는 UPFC의 운전조건을 고려하여 계전기의 보호구간을 재설정할 필요가 있다.

2. 본 론

2.1. UPFC 특성

UPFC의 구조는 GTO 싸이리스터로 구성된 두 개의 인버터가 하나의 직류 캐패시터를 공유해 서로 연결되어 있으며 각각의 인버터는 변조율과 위상각을 독립적으로 제어 가능하다. 송전선로와 병렬로 연결된 인버터의 주요기능은 송전선로와 직렬로 연결된 인버터에게 필요로 하는 유효전력을 공급하는 것이고 직렬로 연결된 인버터는 계통과 동일한 주파수의 교류전압을 선로에 직렬로 주입하는 주 기능을 갖는다. UPFC에 의한 송전선로



a) UPFC 없는 경우 b) UPFC 있는 경우
그림 2. UPFC 유·무에 따른 벡터선도

2.2. UPFC 시뮬레이션을 위한 계통 모델링

UPFC에 사용된 인버터는 PWM 스위칭방식을 사용하였으며 그림 3은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 UPFC 및 송전선로를 구현한 모델계통을 나타낸 것이다.

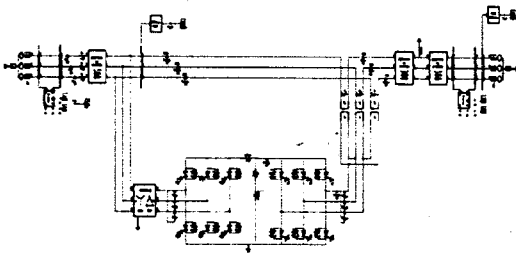


그림 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 UPFC가 연계된 모델계통

송전선로에서 지락사고가 발생시 UPFC가 연계되지 않았을 경우와 연계되었을 경우를 모의하여 거리계전기가 보는 임피던스를 그림 4와 5에 나타내었다. 그림 4에서처럼 UPFC가 연계되지 않았을 때 1선 지락 사고가 발생하면 거리계전기에서 보는 임피던스는 $103.986 + j53.511\Omega$ 이었다. 일반적으로 계전기가 보는 임피던스는 경부하시 R축으로 Underreach하는 경향이 있는데, 이 경우도 R축 Underreach가 발생하였음을 알 수 있다. 반면에 같은 조건에서 보상전압의 크기가 0.1 pu이고 위상각이 90° 로 UPFC가 운전된다면 그림 5에서와 같이 거리계전기가 보는 임피던스는 $206.366 + j42.273\Omega$ 로 변하게 된다. 이러한 이유는 그림 2의 벡터도에서 보여지는 것처럼 UPFC에 의해 선로 보상전압 V_{sc} 가 주입되면 선로전류는 변하게 되어 계전기가 보는 선로 임피던스가 변하게 되기 때문이다.

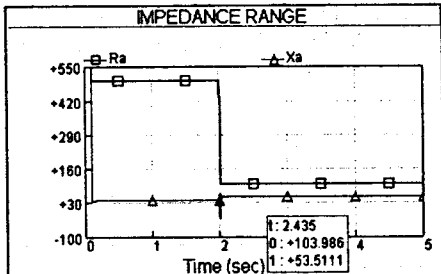


그림 4. 거리계전기가 보는 임피던스

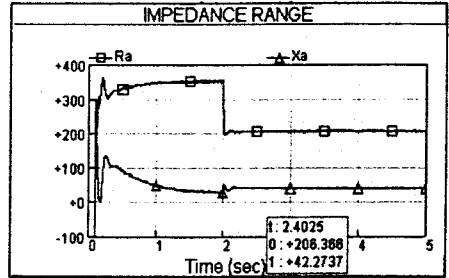


그림 5. UPFC연계시 거리계전기가 보는 임피던스

3. 사례연구

사례연구를 위해 UPFC가 연계된 계통 등가회로를 그림 6에 나타내었고, 여기에서 시스템 매개변수와 계통 조건은 아래와 같이 나타내었다. h 와 δ 는 양단 전압원 사이의 크기와 위상을 나타낸다.

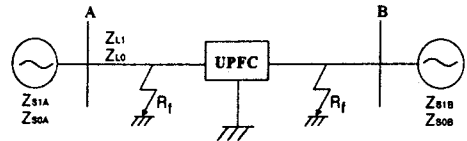


그림 6. UPFC가 연계된 등가회로

$$h=0.95, \delta=9^\circ$$

Source voltage: 154 kV

Line length : 200 km

$$Z_{S1A} = 0.5334 + j4.1126\Omega$$

$$Z_{S0A} = 1.8712 + j10.096\Omega$$

$$Z_{S1B} = 0.5929 + j4.9798\Omega$$

$$Z_{S0B} = 2.3598 + j11.6198\Omega$$

$$Z_{L1} = 0.0436 + j0.3445\Omega/\text{km}$$

$$Z_{L0} = 0.2380 + j1.0443\Omega/\text{km}$$

사고지점은 계전기 설치점에서 0%~95%까지 모의하였고 사고종류는 고장저항 20Ω 을 갖는 1선지락 사고이다. 또한 UPFC의 설치지점은 계전기 설치지점과 선로의 중간지점에 설치한 경우이다. 여기서 UPFC의 전압 보상 크기와 위상을 변화 시켰을 경우 거리 계전기가 보는 임피던스는 표 1과 2에 나타내었다. 송전선로 중간지점에 UPFC연계시 임피던스 변화를 나타낸 표 1에서 선로에 직렬로 주입되는 전압의 크기 $r\delta$ 를 0.5 pu 까지 증가시켰을 경우 선로 리액턴스값은 θ 가 0° 와 90° 인 경우에는 점차 감소하는 반면, θ 가 180° 일때는 다소 증가하는 현상이 나타났다. 이에 반해 선로 저항값은 θ 에 관계없이 감소하였다. 표 2에서는 UPFC가 계전기 설치지점에 연계된 경우 선로 리액턴스값은 선로 중간지점에 UPFC를 연계한 경우 보다 크게 변화하였고 선로 저항값은 UPFC를 선로 중간지점에 설치하였을 때와 비슷하였다. 이러한 결과를 보면 송전선로에 UPFC 연계시 보상전압과 설치지점은 기존의 보호 계전기에 대한 보호협조에 큰 영향을 주기 때문에 이를 충분히 고려하여 거리계전기 정정을 해주어야 된다는 것을 알 수 있다.

표 1. 선로 중간지점에 UPFC연계시 임피던스 변화

r	0°		90°		180°	
	R _o Ω	X _o Ω	R _o Ω	X _o Ω	R _o Ω	X _o Ω
0.0	215.62	51.63	215.62	51.63	215.62	51.63
0.1	201.54	49.54	206.36	42.27	209.23	44.55
0.2	186.04	47.82	164.05	40.83	198.23	42.92
0.3	166.65	44.74	128.91	33.99	187.45	41.65
0.4	155.65	41.59	120.27	25.24	182.08	43.78
0.5	142.25	38.54	99.36	25.19	179.10	57.12

표 2. 계전기 설치지점에 UPFC연계시 임피던스 변화

r	0°		90°		180°	
	R _o Ω	X _o Ω	R _o Ω	X _o Ω	R _o Ω	X _o Ω
0.0	215.62	51.63	215.62	51.63	215.62	51.63
0.1	172.57	58.93	147.39	34.65	173.27	45.94
0.2	158.62	60.08	137.42	18.71	150.54	41.97
0.3	144.37	76.64	122.64	10.51	142.86	40.78
0.4	121.79	87.23	107.34	5.72	133.90	36.91
0.5	104.06	105.14	95.34	2.94	124.47	32.11

송전선로에 UPFC를 연계한 경우 거리계전기의 동작 특성을 분석하기 위하여 1선 지락사고를 송전계통의 95%지점에서 0%지점까지, 사고시 고장 저항값을 150Ω에서 0Ω까지 모의하여 그 결과를 검토하였다. 그림 7, 8, 9에서는 보상전압 크기를 최대 보상전압 크기인 0.5 pu로 고정시키고 위상각을 각각 0°, 90° 그리고 180°로 UPFC를 운전한 경우와 연계되지 않았을 경우의 기존의 거리계전기가 보는 보호 범위를 비교하여 나타내었다. 보상전압 크기는 0.5 pu 이고 위상각이 0°로 UPFC를 운전하게 되면 그림 7에서 나타난 것처럼 UPFC가 없는 경우보다 R축 Underreach는 감소한 반면 X축 Overreach는 더욱 심하게 나타났다. 따라서 먼 지점에서 (95%부근) 고저항 지락사고가 발생하면 UPFC가 없는 경우에 비해 거리계전기는 Overreach할 가능성이 훨씬 많은 것을 알 수 있다. 그림 8에서 보면 UPFC에 의한 보상전압 위상각이 90° 일 경우는 UPFC가 연계되지 않았을 때보다 보호범위가 줄어들어 Overreach할 가능성은 더욱 커진 반면 그림 9에서처럼 위상각이 180° 일 경우는 Underreach할 가능성이 UPFC가 없는 경우에 비해 크게 나타남을 알 수 있다.

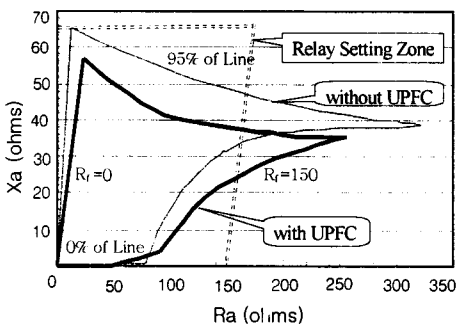


그림 7. UPFC($r=0.5, \theta=0^\circ$) 있는 경우 거리계전기가 보는 임피던스 범위

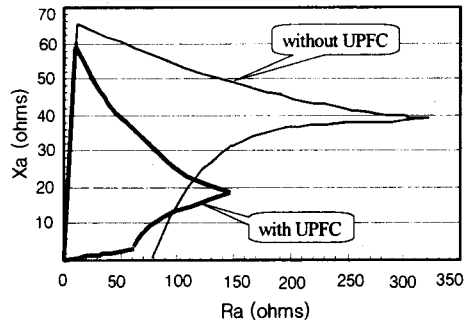


그림 8. UPFC($r=0.5, \theta=90^\circ$)가 있는 경우 거리 계전기가 보는 임피던스 범위

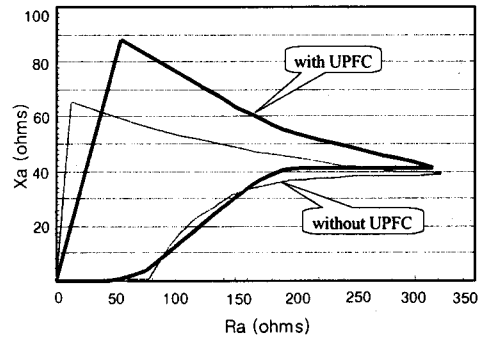


그림 9. UPFC($r=0.5, \theta=180^\circ$)가 있는 경우 거리 계전기가 보는 임피던스 범위

이러한 결과로 보면 송전선로에 UPFC가 연계되면 보호협조 측면에서 거리계전기가 보는 선로의 보호구간이 상당히 달라지므로 오동작이나 부동작이 일어나지 않도록 신중한 판단을 해야한다.

4. 결 론

현재 활발히 연구되어 실용화 단계에 있는 UPFC기가 송전계통에 연계 되므로써 계통의 정수가 변화하여 이를 근거로 보호구간을 판단하는 거리계전기의 동작특성은 변화된다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 거리계전기의 보호구간을 정정할 때 UPFC기기의 보상 특성과 설치 지점에 따른 영향을 미리 충분히 검토하여 거리계전기의 정정에 반영해야 할 필요성이 있음을 제시하였다. 이러한 UPFC설치에 따른 거리계전기의 응답 특성 변화는 앞으로 보호협조시 참고자료가 되어 오동작 및 부동작을 최소화하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- (1) P. K. Dash, A. K. Pradhan and A. C. Liew, "Adaptive Relay Setting for Flexible AC Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 38~43, 2000.
- (2) Y. L. Kang, G. B. shrestha and T. T. Lie, "Component Level Cascade Control of UPFC", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 502~507, 2000.
- (3) C. F. Wagner, R. D. Evans, "Symmetrical Components", 1993.