

송전선로에 UPFC연계시 거리계전기 동작특성에 관한 연구

(A Study on Distance Relay Characteristics for Transmission Line with the Unified Power Flow Controller)

서정남* · 정창호 · 김진오

(Jung-nam Suh · Chang-Ho Jung · Jin-O Kim)

요 약

본 연구에서는 FACTS 기기 중 가장 우수한 기기로서 활발히 연구가 진행되고 있는 UPFC가 송전계통에 연계되었을 경우 거리계전기가 보는 임피던스 특성을 분석하였다. 최근, 계통 안정도와 전력 전송용량을 증가시키기 위해 UPFC가 사용됨에 따라 기존의 보호계전기에 어떠한 영향을 줄 것인가를 미리 연구하여 보호계전기가 오동작 및 부동작이 나지 않도록 대책을 강구할 필요성이 있다. UPFC가 연계되어 운전되면 송전계통의 조건이 UPFC의 운전조건에 따라 변하게 되고 송전선로 보호용으로 설치된 거리계전기가 보는 임피던스값도 영향을 받을 것이다. 따라서 UPFC가 설치된 선로에서 사고를 검출하는 거리계전기가 임피던스를 계산시 UPFC기기에 의한 보상전압 크기와 위상을 충분히 고려해서 계산되어야 한다. 본 연구에서는 UPFC기기가 연계된 송전선로에서 사고 발생시, 거리 계전기의 오동작을 방지하기 위해 보호협조가 필요함을 제시하였으며 PSCAD/EMTDC를 통해 UPFC와 계통을 모델링하여 사고를 모의후 거리계전기가 보는 임피던스 특성을 분석하였다.

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.

Key Words : UPFC(Unified Power Flow Controller), Distance Relay, FACTS, Protective Relay

1. 서 론

* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 석사과정
Tel : 043-261-6605, Fax : 043-261-6629
E-mail : suh-21c@hanmail.net
접수일자 : 2001년 11월 19일
1차심사 : 2001년 11월 21일
심사완료 : 2001년 12월 28일

최근 급속도로 발전하는 전력전자기술과 정밀제어 기술을 이용하여 송전용량의 증가 및 전력조류의 최적화를 위한 FACTS(Flexible AC Transmission System)기기가 각광을 받고 있다.

그 중에서도 UPFC(Unified Power Flow Controller)는 선로의 전압을 임의의 크기와 위상을 갖도록 신

속히 제어하여 선로로 전송되는 유효전력이나 무효 전력도 총체적으로 보상하는 기능을 갖을 뿐만 아니라 STATCOM이나 SSSC같은 독립적 기능으로도 사용가능하기 때문에 가장 우수한 FACTS기기가 될 수 있다. 이런 우수한 기능을 갖는 UPFC가 계통에 연계되어 운영된다면 계통 보호분야 측면에서 볼 때 새로운 문제가 야기될 수 있다. 그 이유는 UPFC연계로 인하여 계통조건이 변하기 때문에 계통의 영향을 많이 받는 거리계전기에 영향을 주어 계통보호 시스템이 오동작 및 부동작이 발생할 수 있기 때문이다. 또한 UPFC의 운전방식과 설치지점에 따라 기존의 거리계전기가 받는 영향도 다르기 때문에 계통 상황을 정확히 예측하여 보호 계전기 정정을 해야 할 것이다 [1]. 국외에서는 UPFC가 계통에 연계되어 계통보호 측면의 연구가 진행되고 있지만 국내에서는 이에 대한 연구가 전무하여 이에 대한 활발한 연구가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 사용하여 UPFC가 송전선로에 연계되었을 경우와 연계되지 않았을 경우에 기존의 거리계전기가 어떠한 특성을 나타내는가를 비교 분석하여 보호협조가 필요함을 제시하였다.

2. UPFC동작특성

2.1 UPFC 보상원리

송전선로에 UPFC가 연계된 경우 전송 가능한 유효전력과 무효전력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고 UPFC 보상원리는 그림 2처럼 계통 등가회로로 나타낸다.

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

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

계통 등가회로를 보면 실제 송전선로에 인가된 전압은 $V_s + V_{pq}$ 이고 선로에 흐르는 전류와 선로에 걸리는 전압은 UPFC에 의한 주입전압 V_{pq} 의 크기와 위상을 변경함으로써 조정 가능하게 된다.

이러한 원리로 UPFC를 제어함으로써 송전선로의 유효·무효전력제어가 가능하게 된다. 따라서 이런 특

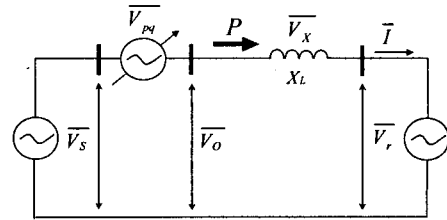


그림 1. UPFC연계된 계통 등가회로
Fig. 1. System Equivalent with UPFC

X_L : 선로리액턴스 V_{pq} : UPFC에 의한 보상전압

V_s : 송전단 전압 V_r : 수전단 전압

성을 가진 UPFC가 계통에 연계된다면 부하전류에 영향을 많이 받는 거리계전기가 오동작할 가능성이 많아지게 되므로 연계되는 UPFC의 운전조건을 고려하여 계전기 정정시 이를 고려할 필요가 있다 [2].

2.2 UPFC가 보호계전기에 미치는 영향

UPFC의 운전방식에 따라 유효·무효전력의 제어가 가능하며 이때 보상정도에 따라 부하전류도 다르게 된다. 선로에 직렬로 주입되는 전압벡터 V_{pq} 의 크기는 보통 $0 < V_{pq} < 0.5 \text{ PU}$ 이고 위상각은 $0 < \rho < 360^\circ$ 범위의 제어가 가능하다. UPFC가 설치된 경우 송전선로에 흐르는 부하전류는 식 (2)와 같이 나타난다.

$$I = \frac{V_s - V_r + V_{pq}}{jX} \quad (2)$$

따라서 부하전류는 UPFC에 의한 V_{pq} 의 보상정도에 따라 다르게 되고 거리계전기가 보는 임피던스에 영향을 주게 된다. 일반적으로 선로의 임피던스를 계산하여 보호하는 거리계전기는 계전기가 설치된 모선의 전압과 선로 전류만을 이용하므로 계통의 부하전류와 역률에 따라 고저항 지락사고가 발생하면 거리계전기가 보는 임피던스의 특성도 변화하여 거리계전기의 Underreach 및 Overreach의 원인이 된다. 고장저항이 클수록 부하의 전류와 역률에 영향을 받아 실제의 임피던스와 차이가 발생하여 실제 정정한 범위를 벗어나 거리계전기가 Underreach하거나 Overreach하는 원인이 된다.

3. UPFC연계시 거리계전기가 보는 임피던스 계산

송전선로에 UPFC 연계시 거리계전기가 보는 임피던스 계산을 알아보기 위하여 그림 2처럼 계전기 설치 지점인 A모선에 UPFC기기를 설치하고 선로 중간지점에 1선 지락사고를 모의하였다. 여기서 α 는 사고 지점을 나타낸다.

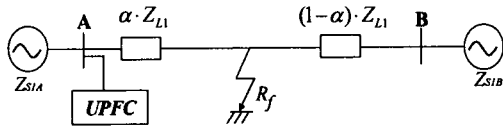


그림 2. UPFC기기가 설치된 송전선로
Fig. 2. Equivalent Circuit with UPFC

송·수전단 전압식은 식 (3)과 같고 여기서 h 와 δ 는 양단 전압원 사이의 크기와 위상을 나타낸다.

$$\frac{V_r}{V_s} = h \cdot e^{-j \cdot \delta} \quad (3)$$

UPFC제어가 가능한 전압보상 범위는 식 (4)와 같으며 여기서 r 은 UPFC에서 보상 가능한 전압크기를 나타내고 ρ 는 보상전압 위상을 나타낸다.

$$V_{pr}(r, \rho) = |V_s| \cdot r \cdot e^{\rho \cdot j} \quad (4)$$

양단전원에 UPFC가 송전선로에 연계되었을 경우 사고전 부하전류와 위상은 r, ρ, h, δ 에 의해 달라지며 식 (5), (6)과 같다.

$$I_L(r, \rho, h, \delta) = \frac{V_s - V_R(h, \delta) + V_{pr}(r, \rho)}{Z_{1A}(a) + Z_{1B}(a)} \quad (5)$$

$$IP_L(r, \rho, h, \delta) = (\arg(I_L(r, \rho, h, \delta))) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (6)$$

송전계통에 1선 지락사고가 일어났을 경우의 사고상 A상 전류는 식 (7)과 같고 여기서 I_L 은 부하전류를 나타내며 I_{AF} 는 A모선에 설치된 계전기가 보는 고장전류로서 정상분 (I_{1A}), 역상분 (I_{2A}), 영상분 (I_{0A}) 전

류의 합으로 구할 수 있다. ($I_{AF} = I_{1A} + I_{2A} + I_{0A}$)

$$I_A = I_L + I_{AF} \quad (7)$$

계전기 설치점에서의 전압은 정상분, 영상분, 역상분 전압의 합으로 구할 수 있는데 이 전압은 식 (8)과 식 (9) 그리고 식 (10)으로 나타낸다.

$$V_1 = (I_{1A} + I_L)Z_{L1} \quad (8)$$

$$V_2 = I_{2A} \cdot Z_{L1}, (Z_{L2} = Z_{L1}) \quad (9)$$

$$V_0 = I_{0A} \cdot Z_{L0} \quad (10)$$

여기서 고장지점으로 흐르는 정상분 (I_{1F}), 역상분 (I_{2F}), 영상분 (I_{0F}) 고장전류는 같다. 따라서 계전기 설치점의 A상 전압은 식 (11)처럼 나타낸다.

$$V_A = (I_{1F} + I_{2F} + I_{0F})R_F + V_1 + V_2 + V_0 \quad (11)$$

그러므로 A모선 측에 설치된 계전기가 보는 임피던스(식 12)는 UPFC에 의해 I_L 이 변하게 됨에 따라 식 7과 식 11의 V_1 의 값에 따라 달라진다.[4]

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A + \left(\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L0}}\right) \cdot I_0} \quad (12)$$

4. 사례 연구 및 시뮬레이션 결과

사례연구를 위해 UPFC가 연계된 계통 등가회로를 그림 3에 나타내었고, 여기에서 시스템 매개변수와 계통조건은 아래와 같이 나타내었다.

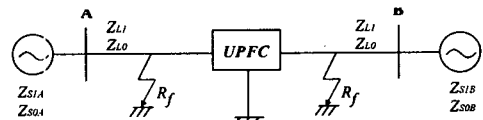


그림 3. UPFC가 연계된 등가회로
Fig. 3. Equivalent Circuit with UPFC

양단 전압원 사이의 크기와 위상 $h=0.95, \delta=9^\circ$
Source voltage : 154[kV] , Line length : 200[km]

$$\begin{aligned} Z_{S1A} &= 0.5334 + j4.1126[\Omega], \\ Z_{S0A} &= 1.8712 + j10.096[\Omega] \\ Z_{S1B} &= 0.5929 + j4.9798[\Omega], \\ Z_{S0B} &= 2.3598 + j11.6198[\Omega] \\ Z_{L1} &= 0.0436 + j0.3445[\Omega/\text{km}], \\ Z_{L0} &= 0.2380 + j1.0443[\Omega/\text{km}] \end{aligned}$$

본 연구에서 사고지점은 계전기 설치점에서 95%까지 모의하였고 사고종류는 고장저항 20Ω을 갖는 1선 지락 사고일 경우이다. 또한 UPFC의 설치지점은 계전기 설치지점과 선로의 중간지점에 설치하였고 이에 따른 임피던스 변화를 표 1과 2에 나타내었다. 표 1에서 보면 보상 전압 크기 r 값을 0.5 pu 까지 증가시킬 경우 선로 리액턴스 값은 θ 가 0° 와 90° 일 경우 점차 감소하는 반면, 180° 일 때는 다소 증가하였다. 이에 반해 선로 저항값은 θ 변화에 관계없이 감소하였다.

표 1. 선로 중간지점에 UPFC연계시 임피던스 변화
Table. 1. Apparent Impedance at UPFC of mid point

r	0°		90°		180°	
	R_a	X_a	R_a	X_a	R_a	X_a
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	52.55
0.2	186.04	47.82	164.05	40.83	198.23	52.92
0.3	166.65	44.74	128.91	33.99	187.45	53.65
0.4	155.65	41.59	120.27	25.24	182.08	55.78
0.5	142.25	38.54	99.36	25.19	179.10	57.12

표 2에서는 UPFC가 계전기 설치지점에 연계된 경우로서 선로 저항값은 선로 중간지점에 UPFC를 연계한 경우 보다 크게 변화했고 선로 리액턴스값은 UPFC를 선로 중간지점에 설치하였을 때와 비슷한 값이 나왔다. 이러한 결과를 보면 송전선로에 UPFC 연계시 보상전압과 설치지점에 따라 기존의 보호 계전기에 대한 보호협조에 큰 영향을 주기 때문에 이를 충분히 고려하여 정정을 해야 된다는 것을 알 수 있다[3].

송전선로에 UPFC를 연계한 경우 거리계전기의 trip boundary를 분석하기 위하여 1선 지락사고를 송전계통의 95%지점에서 0%지점까지, 사고시 고장 저항값을 150Ω에서 0Ω까지 모의하여 그 결과를 검토

표 2. 계전기 설치지점에 UPFC연계시 임피던스 변화

Table. 2. Apparent Impedance at UPFC of relay point

r	0°		90°		180°	
	R_a	X_a	R_a	X_a	R_a	X_a
0.0	215.62	51.63	215.62	51.63	215.62	51.63
0.1	172.57	48.93	171.39	44.65	173.27	52.84
0.2	158.62	42.08	152.42	42.71	150.54	53.77
0.3	124.37	40.64	114.64	40.51	142.86	53.78
0.4	92.79	37.23	82.34	39.72	133.90	56.91
0.5	60.63	35.95	51.15	35.26	124.47	59.11

하였다. 그림 4, 5, 6, 7에서는 UPFC를 송전선로의 중간지점에 연계 후 보상전압 크기를 최대 보상전압 크기인 0.5 pu로 고정시키고 위상각을 각각 0°, 90°, 180° 그리고 270° 로 UPFC를 운전한 경우와 연계되지 않았을 경우의 기존의 거리계전기가 보는 trip boundary를 비교하여 나타낸 임피던스 특성을 나타내었다. 보상전압 크기는 0.5 pu 이고 위상각이 0° 로 UPFC를 운전하게 되면 그림 4에서 나타난 것처럼 UPFC가 없는 경우보다 R축으로 Underreach한 반면 X축 Overreach는 다소 심하게 나타났다. 따라서 먼 지점에서(95%부근) 고저항 지락사고가 발생하면 UPFC가 없는 경우에 비해 거리계전기는 Overreach할 가능성이 훨씬 많은 것을 알 수 있다.

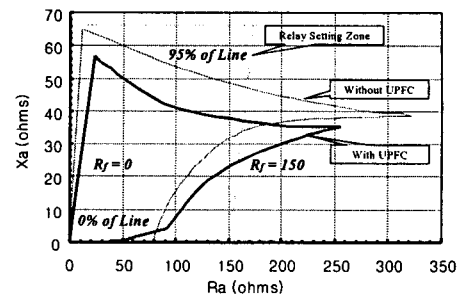


그림 4. UPFC ($r=0.5, \rho=0^\circ$)가 선로 중간지점에 있는 경우 거리계전기가 보는 임피던스 범위

Fig. 4. Trip boundary $r=0.5$ and $\rho=0^\circ$ at mid point

그림 5에서 보면 UPFC에 의한 보상전압 위상각이 90° 일 경우는 UPFC가 연계되지 않았을 때보다

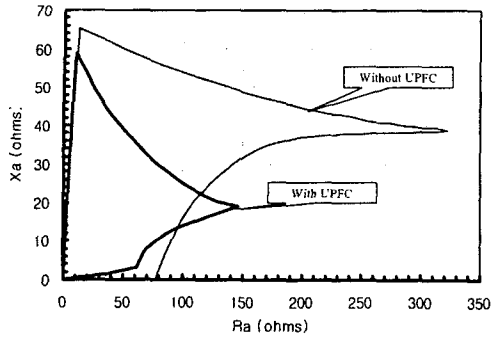


그림 5. UPFC ($r=0.5, \rho=90^\circ$)가 선로 중간지점에 있는 경우 거리계전기가 보는 임피던스 범위

Fig. 5. Trip boundary $r=0.5$ and $\rho=90^\circ$ at mid point

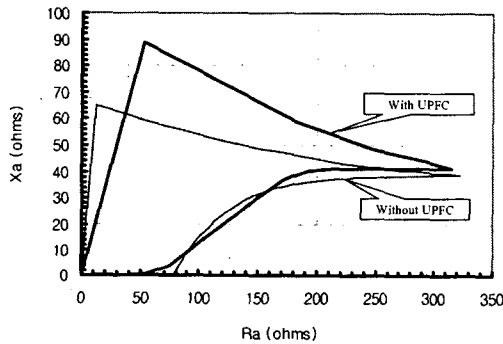


그림 6. UPFC ($r=0.5, \rho=180^\circ$)가 선로 중간지점에 있는 경우 거리계전기가 보는 임피던스 범위

Fig. 6. Trip boundary $r=0.5$ and $\rho=180^\circ$ at mid point

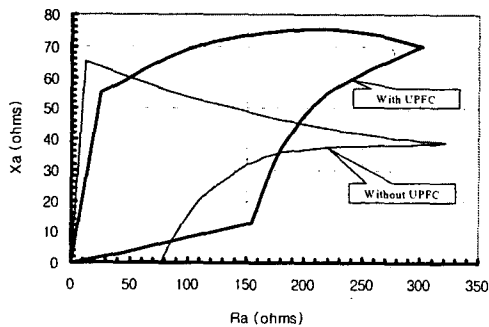


그림 7. UPFC ($r=0.5, \rho=270^\circ$)가 선로 중간지점에 있는 경우 거리계전기가 보는 임피던스 범위

Fig. 7. Trip boundary $r=0.5$ and $\rho=270^\circ$ at mid point

trip boundary가 줄어들어 X축 Overreach할 가능성은 더욱 커진 반면 그림 6에서처럼 위상각이 180° 일 경우는 Underreach할 가능성이 UPFC가 없는 경우에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 위상각이 270° 로 운전된 그림 7에서는 고저항 지락사고가 커질수록 Underreach되는 경향이 심하게 일어나다 점차 감소하는 경향을 나타낸다.

FACTS기기들은 계통의 설치지점에 따라 운전 효과가 달라지므로 이번에는 UPFC를 계전기 설치지점에 설치하였을 경우에 나타날 수 있는 계전기가 보는 임피던스 특성을 그림 8, 9, 10, 11에 나타내었다. UPFC 운전 조건은 선로 중간지점에 설치하였을 경우와 같은 조건을 가졌다.

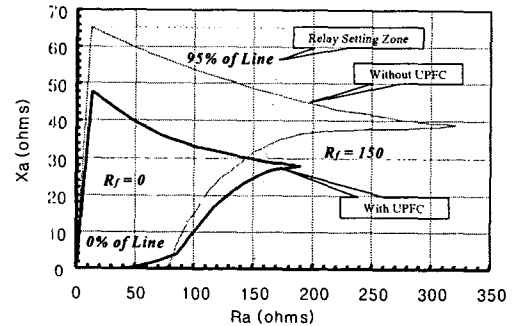


그림 8. UPFC ($r=0.5, \rho=0^\circ$)가 계전기 설치지점에 있는 경우 거리계전기가 보는 임피던스 범위

Fig. 8. Trip boundary $r=0.5$ and $\rho=0^\circ$ at relay point

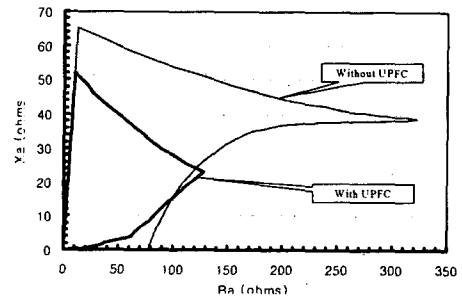


그림 9. UPFC ($r=0.5, \rho=90^\circ$)가 계전기 설치지점에 있는 경우 거리계전기가 보는 임피던스 범위

Fig. 9. Trip boundary $r=0.5$ and $\rho=90^\circ$ at relay point

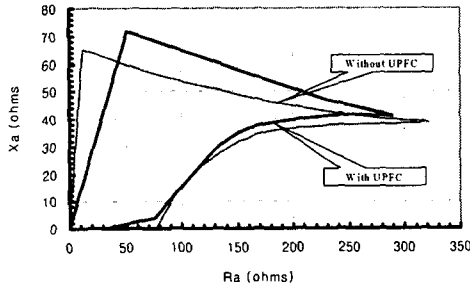


그림 10. UPFC ($r=0.5, \rho=180^\circ$)가 계전기 설치지점에 있는 경우 거리계전기가 보는 임피던스 범위

Fig. 10. Trip boundary $r=0.5$ and $\rho=180^\circ$ at relay point

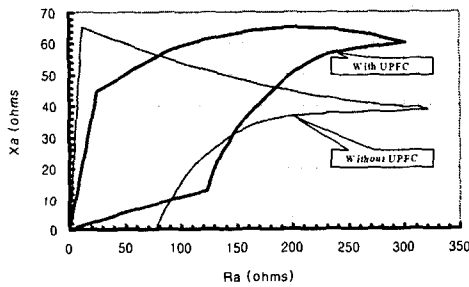


그림 11. UPFC ($r=0.5, \rho=270^\circ$)가 계전기 설치지점에 있는 경우 거리계전기가 보는 임피던스 범위

Fig. 11. Trip boundary $r=0.5$ and $\rho=270^\circ$ at relay point

UPFC를 계전기 설치지점에 설치하였을 경우 계전기가 보는 임피던스 특성을 살펴보면 선로 중간지점에 설치하였을 경우보다 R축과 X축 모두 약간씩 감소되는 경향을 보였다. 위상각이 0° 로 UPFC를 운전하게 되면 그림 8에서 나타난 것처럼 UPFC가 없는 경우보다 R축으로 Underreach한 반면 X축 Overreach는 더욱 심하게 나타났다. 마찬가지로 위상각을 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 로 변화시킨 그림 9, 10, 11에서도 UPFC를 선로 중간지점에 설치하였을 경우보다 trip boundary가 다소 축소되어 Overreach 및 Underreach가 더욱 많이 나타났다.

이러한 결과로 보면 송전선로에 UPFC가 연계시 보호협조 측면에서 거리계전기가 보는 선로의 보호구간이 많이 달라지므로 오동작 및 부동작이 일어나지 않도록 신중한 판단을 하여 보호계전기 정정을 해야한다.

5. 결론

현재 FACTS기기중 활발히 연구되어 실용화 단계에 있는 UPFC기기가 송전계통에 연계 될 경우 거리계전기의 동작특성은 경우에 따라 많은 변화가 예상된다.

따라서 본 논문에서는 거리계전기의 보호구간을 정정할 때 UPFC기기의 설치위치와 운전조건에 따라 미리 충분히 검토하여 계전기 정정에 반영해야 할 필요성이 있음을 검증하였다. UPFC의 운전조건에 따라 기존의 거리계전기가 오동작할 수 있는 Underreach, Overreach범위가 경우에 따라서 많은 변화가 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 UPFC설치에 따른 거리계전기의 용동특성 변화는 앞으로 보호협조시 참고자료가 되어 오동작 및 부동작을 최소화하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

References

- [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] P. K. Dash, A. K. Pradhan and A. C. Liew, "Digital Protection of Power Transmission Lines in The Presence of Series Connected FACTS Devices", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, pp. 1967-1972, 2000.
- [4] C. F. Wagner, R. D. Evans, "Symmetrical Components", 1933.

◇ 저자소개 ◇

서 정 남 (徐廷男)

1973년 8월 19일생. 2000년 서울산업대학교 전기공학과 졸업, 현재 한양대학교 전기공학과 석사과정.

정 창 호 (丁昌鎬)

1966년 6월 15일생. 1994년 원광대학교 전기공학과 졸업, 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996-1997년 전력연구원 위촉연구원, 1997-1999년 LG산전 전력연구소 연구원, 현재 한양대학교 전기공학과 박사과정.

김 진 오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(박사), 현재 한양대학교 공과대학 전기공학과 부교수.