

FACTS 기기가 설치된 송전선로에서 거리계전기의 응답특성

정창호 · 서정남 · 방성원 · 김진오
한양대학교 전기공학과

A Study of Distance Relay Characteristic of Transmission Line including FACTS Devices

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

Abstract - This paper discusses the operational characteristic analysis of distance relay depending on the power system parameters in transmission line including FACTS devices. Distance relay requires protective coordination because the FACTS devices change power system parameters to increase power transmission capacity.

In this paper, the dynamic operational characteristics of distance relay are analyzed for the effect of fault resistance and operation mode of FACTS devices according to the installed points of these devices.

1. 서 론

송전선로 보호용 계전기는 전류차동방식과 거리계전방식이 많이 사용되고 있다. 전류차동방식의 PCM전류차동계전기는 상대단의 전류를 PCM광통신으로 수신하여 판단하므로 내부사고 판단에 정확하게 동작하며 고저항 지락사고에 대해서도 어느 정도 좋은 특성을 가지고 있어 송전선로 보호시 주보호장치로 사용되고 있다. 그러나 이러한 좋은 장점에도 불구하고 PCM전류차동계전기는 내부사고에 대해서만 사고를 감지하므로 후비보호로는 사용될 수 없으며 통신장치의 고장이나 기타 원인으로 인한 통신불량시 동작하지 않아 후비보호장치가 필수적이다. 특히 우리나라와 같이 단거리 선로가 많아 계전기의 신속한 동작이 더욱 요구되는 곳에서는 후비보호의 중요성이 한층 더 요구된다.

따라서 이러한 후비보호로 가장 많이 사용되는 거리계전기는 자단의 전압과 전류로만 동작하도록 되어있어 후비보호가 가능하고 외부사고에 대해서도 감지가 가능하다. 그러나 거리계전기는 계통의 영향을 가장 많이 받는 계전기이기도 하여 계통상황을 정확하게 예측하여 계전기 정정에 반영하여야 오동작과 부동작을 방지할 수 있다. 계통의 영향으로는 역률과 부하임피던스 그리고 고장저항등을 들 수 있다. 특히 요즘 활발히 연구되고 있고 일부 시험운전이 실시되고 있는 FACTS기기는 계통의 송전용량을 증대시키기 위한 목적으로 연구되고 있는데 이러한 설비들은 계통의 무효전력을 제어하거나 유효전력까지 제어가 가능하여 FACTS기기가 송전선로에 설치되었을 경우 계통의 영향을 많이 받는 거리계전기의 입장에서 충분한 특성연구가 필요할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 다양한 FACTS기기가 송전선로에 설치되었을 경우 기존의 거리계전기가 어떠한 특성을 가지고 동작할 것인가를 미리 예측하여 보호협조에 적용하고 새로운 보호알고리즘을 개발하는데 목적을 두고 있다.

2. 본 론

2.1. 거리계전기가 보는 임피던스

거리계전기가 측정하는 임피던스는 계전기가 설치된 지점에서의 전압과 전류를 이용하므로 부하나 역률이 변하여 고저항 지락사고가 발생하면 거리계전기가 보는 임피던스의 특성도 변화하여 거리계전기의 Underreach 및 Overreach의 원인이 된다.

거리계전기의 임피던스 계산은 아래와 같다.

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A + \left(\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L0}}\right) \cdot I_0} \quad (1)$$

여기서,

- * Z_A = A Phase impedance
- * I_A = A Phase line current
- * V_A = A Phase line voltage
- * Z_{L0} = Zero-sequence line impedance
- * Z_{L1} = Positive-sequence line impedance
- * I_0 = Zero-sequence current

그림 1과 같은 계통에서 1선 지락사고가 발생하면 식 1과 같이 거리계전기가 보는 임피던스는 그림 2와 같은 특성을 갖는다. 고정저항이 클수록 부하의 임피던스와 역률에 영향을 받아 실제의 임피던스와 차이가 발생하여 그림 2와 같이 실제 정정한 범위를 벗어나 거리계전기가 Underreach하거나 Overreach하는 원인이 된다.

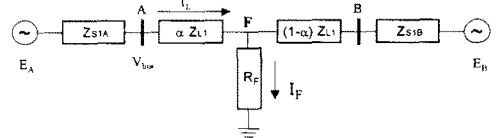


그림 1. 양단전원의 고저항지락사고 모델

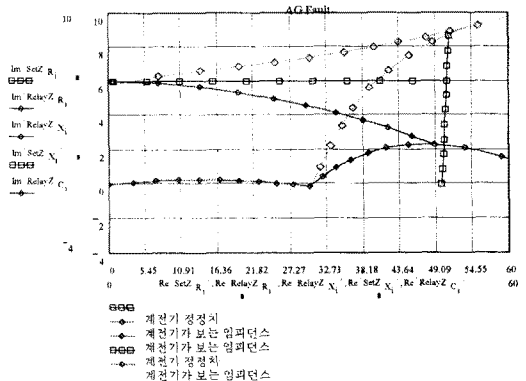


그림 2. 1선 지락사고시 거리계전기가 보는 임피던스

2.2. FACTS기기가 설치된 경우 거리계전기가 보는 임피던스

송전선로에 설치된 FACTS기기의 종류로는 SVC, STATCOM, TCSC, UPFC 등 다양한 기기가 있으나 근원적으로 모두 계통의 무효전력을 조절하여 송전용량을 증대시키는 방식이며 이 가운데 UPFC 등 일부 FACTS기기 중에는 계통의 유효전력도 변화시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 FACTS기기는 계통사고시 전기적인 Bypass가 이루어지고 사고가 지속되는 경우 기계적인 Bypass가 이루어지도록 제어하지만 기계적인 Bypass는 시간적으로 불리하고 전기적인 Bypass는 계통의 사고전류를 감지하여 FACTS기기에서의 보상전압을 Zero로 하여 운전하도록 되어 있다. 본 논문에서는 FACTS기기가 Inductive Mode와 Capacitive Mode로 동작하였을 때 사고가 발생한 경우와 사고가 발생하여 FACTS기기가 전기적인 Bypass가 이루어진 상태에서의 거리계전기의 동동특성을 분석하였다.

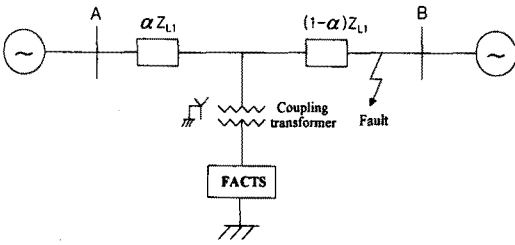


그림 3. FACTS기기가 설치된 송전선로

그림 3에서 A모선에서 선로의 α 지점에 FACTS기기가 설치되고 B모선에서 1선 지락사고가 발생할 경우의 등가회로는 그림 4와 같다.

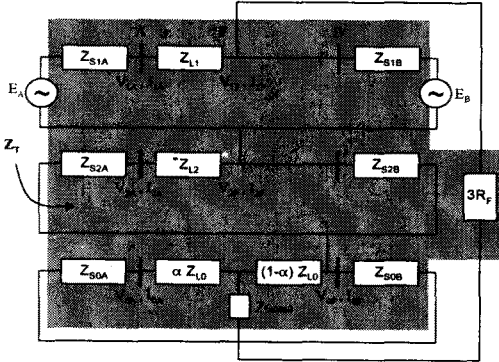


그림 4. FACTS기기가 연계된 계통의 등가회로

물론 FACTS기기중 UPFC나 TCSC와 같이 직렬인덕턴스가 존재하는 경우는 보호협조시 그 만큼을 보상하여 정정하면 가능하므로 직렬인덕턴스는 등가회로에서 제외하였다.

그림 4에서 선로의 각가가의 정상분,역상분 및 영상분의 임피던스는

$$\begin{aligned} Z_{1A} &= Z_{S1A} + Z_{L1} & Z_{1B} &= Z_{S1B} \\ Z_{2A} &= Z_{S2A} + Z_{L2} & Z_{2B} &= Z_{S2B} \end{aligned} \quad (2)$$

$$Z_{L0} = \frac{\alpha Z_{L0} Z_{facts0}}{(\alpha Z_{L0}) + Z_{facts0}} + (1-\alpha)Z_{L0} \quad (3)$$

$$Z_{0A} = \frac{(Z_{S0A} + \alpha Z_{L0}) Z_{facts0}}{(Z_{S0A} + \alpha Z_{L0}) + Z_{facts0}} + (1-\alpha)Z_{L0} \quad (4)$$

Total 임피던스 Z_T 는

$$Z_T = \frac{2Z_{1A}Z_{1B}}{Z_{1A} + Z_{1B}} + \frac{Z_{0A}Z_{0B}}{Z_{0A} + Z_{0B}} + 3R_F \quad (5)$$

고장점 F에서 고장전의 전압은

$$V_F = V_{bus} - I_L Z_{L1} \quad (I_L: \text{부하전류}) \quad (6)$$

정상, 역상, 영상전류 및 고장지점의 전류는

$$I_{1F} = \frac{V_F}{Z_T}, \quad I_{2F} = I_{1F}, \quad I_{0F} = I_{1F} \quad (7)$$

$I_F = I_{1F} + I_{2F} + I_{0F}$ 가 된다.

모선 A부터 사고지점 F까지의 SEQUENCE전류

$$I_{1A} = \frac{Z_{1B}}{Z_{1Z} + Z_{1B}} I_{1F}, \quad I_{2A} = I_{1A} \quad (8)$$

$$I_{0A} = \left(\frac{Z_{0B}}{Z_{0A} + Z_{0B}} I_{0F} \right) \left[1 - \frac{\alpha Z_{L0} + Z_{S0A}}{\alpha Z_{L0} + Z_{S0A} + Z_{facts0}} \right] \quad (9)$$

$$I_{AF} = I_{1A} + I_{2A} + I_{0A} \quad (10)$$

사고상 A상의 전류는

$$I_A = I_L + I_{AF} \quad (11)$$

계전기 설치점에서의 A상의전압은

$$V_A = (I_{1F} + I_{2F} + I_{0F})R_F + (I_L + I_{1A})Z_{L1} + I_{2A}Z_{L1} + I_{0A}Z_{L0} \quad (12)$$

그러므로 A모선측에 설치된 계전기가 보는 임피던스는 식 1에서와 같이 구할 수 있다.

3. 사례연구

사례연구를 위해 사용된 시스템의 정수들은 다음과 같으며 FACTS기기의 설치지점은 선로의 30%, 50%, 70%지점에 대하여 검토하였다.

* System Parameters

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

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

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

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

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

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

$$\alpha = 0.3, 0.5, 0.7, R_F = 0-50 \, \Omega$$

$$\text{Line length} : 25 \, \text{km}$$

$$I_L = 600 \, \text{A}$$

$$Z_{facts0} = \text{Inductive - Capacitive}$$

그림 5는 FACTS기기가 A모선에서 선로의 50%지점에 설치된 경우 1선지락시 고장저항의 변화에 따른 계전기가 보는 임피던스를 측정된 것이다. 고장저항이 약 8 Ω 이하에서는 계전기는 약 14% Overreach하였으며 8 Ω 이상의 고저항지락사고의 경우는 최대 21%정도까지 Underreach하였다. 따라서 FACTS기기가 설치되어 있는 경우 거리계전기는 고저항지락사고시 고장저항의 보호능력이 현저히 감소함을 알 수 있다.

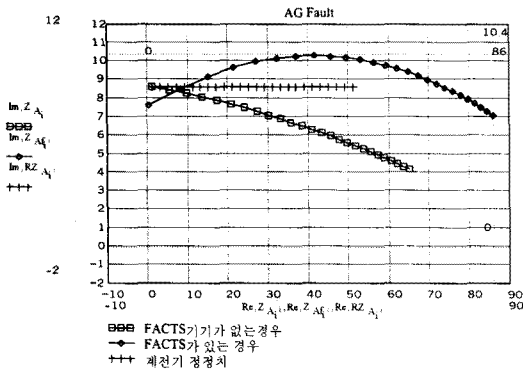


그림 5. FACTS기기가 50%지점에 설치된 경우 R-X

그림 6과 그림 7은 FACTS기기의 설치지점을 90%와 30%지점에 설치한 경우를 나타낸 것이다. FACTS기기가 사고지점의 가까운 곳에 설치된 경우는 일정한 고저항지락까지는 약 10Ω Overreach가 심하게 나타나며 일정한 고저항지락이상의 값에서도 Underreach가 더욱더 심하게 나타남을 알 수 있다. 본 사례연구 경우 10Ω까지는 33%정도 Overreach하였으며 10Ω이상의 지락사고의 경우에 대해서는 28%정도로 Underreach 정도가 증가 하였다.

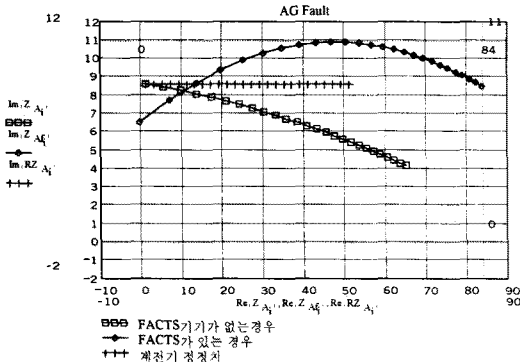


그림 6. FACTS기기가 90%지점에 설치된 경우 R-X

마찬가지로 그림 7에서 FACTS기기가 사고지점과 먼 곳에 설치된 경우는 Overreach 정도와 Underreach 정도가 감소하여 나타났다.

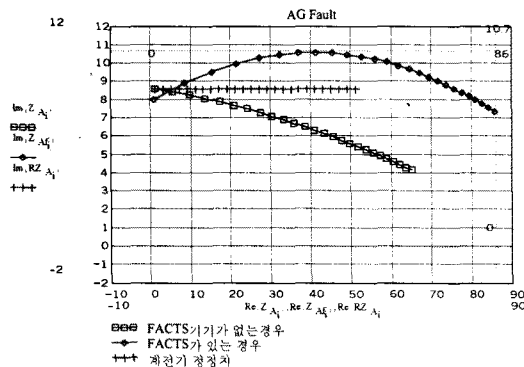


그림 7. FACTS기기가 30%지점에 설치된 경우 R-X

그림 8은 FACTS기기가 Capacitive Mode로 운전하는 경우에 사고가 발생한 경우이다. 물론 사고가 발생하면 전기전인 Bypass가 이루어져 FACTS기기의 보상 전압을 "0"으로 하여 운전하기 때문에 Capacitive Mode인 상태에서 고장이 지속되지는 않을 것으로 사료되나 사고전류를 감지하여 운전모드를 제어하기 때문에 짧은 시간이긴 하지만 그 시간 동안은 거리계전기는 영향을 받을 것으로 생각된다. 이 경우 완전지락에 가까운 사고에 대해서는 Overreach가 크게 증가하지는 않았으나 고저항지락사고의 경우에는 Underreach의 범위가 크게 증가하여 계전기의 고저항 보호능력이 상당히 감소할 것으로 생각된다. 사례연구의 경우 고저항 보호능력은 약 50Ω까지의 고저항지락사고에 대해 50%정도 감소하였다.

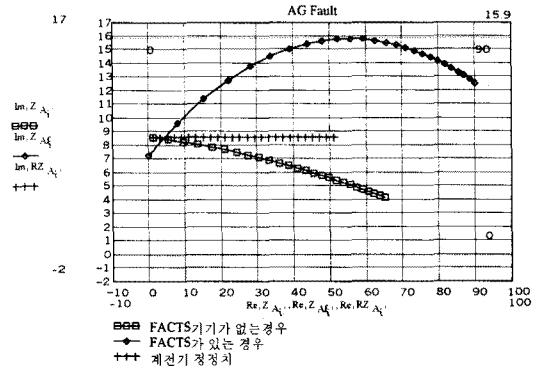


그림 8. FACTS기기가 Capacitive Mode로 동작한 경우 R-X

4. 결 론

현재 활발히 연구되고 실용화에 근접해 있는 FACTS기기는 무효전력과 일부 유효전력까지 보상이 가능하여 향후 많은 적용이 가능할 것으로 생각되지만 송전선의 중간지점, 혹은 모선에 이러한 보상설비를 설치하는 경우 송전선로의 선로정수 및 계통의 정수가 변화하여 이를 근거로 보호구간을 판단하는 거리계전기의 동작특성이 변화한다.

따라서 본 논문에서는 이러한 FACTS기기에 대해 거리계전기의 응답특성을 분석하여 FACTS기기가 설치된 곳에서는 거리계전기가 Underreach할 우려가 있으며 고정저항 보호능력도 현저히 감소함을 알 수 있었다. 이러한 거리계전기의 응답특성 연구를 바탕으로 앞으로 보호협조에 참고자료가 될 것으로 생각되며 본 논문을 바탕으로 향후 다양한 FACTS기기에 대해 여러가지의 운전모드에 따른 응답특성 분석 및 실시간 동특성 시험장비를 이용하여 시험할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Bondia ... "Application Guide on Protection of Co Transmission Network Configurations", SC34-WG04, 5, 1991.
- [2] 정창호, "Adaptive 보호범위를 가진 송전선로 보호용 디지털 거리계전기", 대한전기학회 하계학술대회, 7, 1998.
- [3] C.F. Wagner, R.D. Evans, "Symmetrical Component"
- [4] Narain G. Hingorani, "Understanding FACTS", 1
- [5] Walter Elmore, "Evolution of Distance Relaying Principles", Texas A&M University, April 3-4, 19