

계통 연계 풍력발전단지의 운전효율 향상을 위한 배전 계통의 적응형 보호 계전 알고리즘

°장성일 김지원 최돈만 김광호 김형래°
 °강원대학교, °한국전력 강릉지사

An Adaptive Relaying Algorithm on Utilities' Electrical Feeders for Improving the Reliable Operation of Wind Farm Interconnected with Utility Grid

°Sung Il Jang Ji Won Kim Don Man Choi Kwang Ho Kim Hyung Rae Kim°
 °Kangwon National University °KEPRI

Abstract - This paper proposes the adaptive relaying algorithm of protective devices applied in the neighboring distribution feeders for reliable and efficient operations of a wind farm interconnected with distribution networks by dedicated lines. Generally, it would be highly possible that the wind turbine generators are influenced by abnormal grid conditions such as disturbances occurring in the neighboring distribution feeders as well as the dedicated power line. The delayed operation time of protective devices for satisfying the coordination might overly expose the interconnected wind turbine generators to the fault and cause damage to them. In order to reduce the damages on the interconnected wind farm about the faults happening in distribution networks, this paper describes the proper delayed operation time of protective relay.

1. 서 론

최근에 바람의 힘으로 전력을 생산하는 풍력발전이 국제 에너지 현안과 환경적인 문제와 맞물려 큰 관심을 끌고 있으며, 일부의 풍력발전단지들은 이미 건설되어 연계 계통으로 전력을 공급하고 있다. 일반적으로 큰 규모로 건설되는 풍력발전단지들은, 연계 배전 시스템에 미치는 영향을 최소화시키기 위하여 22.9 kV 배전선과 직접적으로 연결되지 않고 전용선을 이용하여 154/22.9 kV 변전소 모선에 연계 되어 진다. 이와 같은 풍력발전단지가 연계된 배전계통에서, 전용선의 사고는 물론 인근 배전선 사고에 의해 발전기들이 사고 영향을 직접적으로 받을 수 있으며, 그 영향으로 인하여 풍력발전단지는 불안정한 상태로 운전될 수 있다.

인접 배전선에서의 사고로 인하여 모선전압은 급격히 감소하게 되며, 이에 전용선으로 모선에 연계 운전되는 풍력발전단지의 연계 지점에서도 큰 전압 강하가 발생하게 된다. 연계 지점의 전압 감소로 인해 계통 전압의 계급에 비례하는 발전기의 전자기적 토크가 짧은 시간에 급격히 감소하게 되고, 인접 배전선에서 발생한 사고가 보호계전기에 의해 제거 될 때까지 전자기적 토크와 기계적 입력 토크의 차이로 풍력발전기의 회전자는 계속해서 가속하게 될 것이다. 가속된 풍력발전기가 운전 가능 영역을 초과하게 되면 정상적인 전력생산을 하지 못하고 정지하게 된다. 따라서 인접 배전선에서의 사고 제거 시 배전선 보호기들의 보호협조를 만족시키면서 보호계전기의 동작시간을 적절히 선택한다면 외부 배전선 사고에 의한 풍력발전단지에서의 영향을 최소화 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 전용선으로 배전계통에 연계된 풍력발전단지의 안정적인 운전을 위한 인접 배전선의 적응형 보호 계전 알고리즘에 대하여 기술하였다. 제안된 계전

알고리즘은 풍력발전단지의 출력조건과 인접 배전선에서 발생한 사고 조건을 고려하여 배전선에 설치된 보호계전기의 동작시간을 조정하였다. 과도현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 풍력발전단지가 연계된 22.9 kV 횡계 변전소 배전계통을 모델링 하였다. 다양한 사고 조건과 풍력발전단지의 출력조건을 고려하여 구성된 적응형 보호계전 알고리즘은 풍력발전단지가 외부 사고에 대하여 안정적으로 운전할 수 있는 동작 영역의 확대를 가능하게 할 것이다.

2. 본 론

2.1 풍력발전단지 연계 계통 모델링

본 논문에서는 전력계통 과도현상 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 22.9 kV 배전계통을 모델링 하였으며, 풍력발전기는 권선형 유도 발전기들로 가정하여 모의하였다. 연계 배전계통은 우리나라의 22.9 kV 실계통 데이터를 이용하여 구성하였다.

A. 22.9kV 배전선로 및 부하 모델링

풍력발전단지가 연계 운전 될 배전계통은 단락용량이 100 MVA인 22.9 kV 계통이고, 일반적인 ACSR 160 mm²와 95 mm²의 배전선으로 구성되었다. 모선에는 서로 다른 부하용량을 가진 5개의 간선들이 연계되어 있으며, 각 구성요소는 실 계통 데이터를 이용하여 모델링 되었다. 그리고 다양한 사고를 모의하기 위하여 임의의 사고지점을 선정하였는데, 피더 C에 사고지점 2번에서 14번까지를 선정하였다. 그림 1은 사고 모의에 사용된 모델 계통의 단선도이다. 전용선의 총길이는 10 km로 가정하였다. 전용선을 이용하여 계통에 연계된 풍력발전단지는 인접 배전선 사고에 대한 출력조건을 고려하기 위하여 다양한 출력 조건을 갖는 것으로 가정하였다.

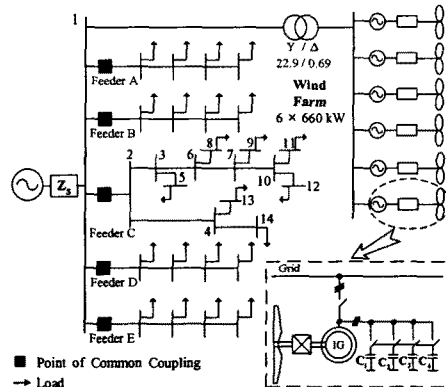


그림 1 풍력발전단지가 연계된 배전 계통

B. 풍력발전단지의 모델링

본 논문에서는 풍력발전단지를 권선형 유도발전기 형태의 Vestas V47-660 kW 6대로 구성하였다 [1]. 권선형 유도 발전기들은 견고하면서도 간단한 구조와 단순한 제어 특성으로 풍력발전 시스템에서 널리 사용되고 있다. 특히, 외부저항 제어를 이용하여 회전자의 속도를 0%에서 10%까지 폭넓은 슬립 영역에서 안정된 출력을 나타낼 수 있다. 다양한 사고 모의에서는 인접 사고에 의해 회전기 속도가 1.1 pu 이상이 될 경우에는 발전기는 정지하도록 설계되었다. 권선형 풍력 유도 발전기는 PSCAD/EMTDC안에서 제공하는 모듈을 이용하였다 [2].

2.2 배전선 사고에 의한 풍력단지의 동작특성

전용선을 이용하여 계통에 연계된 풍력발전단지는 외부 배전선 사고에 의해 부정적인 영향을 받을 수 있는데, 사고 조건 및 발전기 출력 조건에 따라 다른 특성을 갖는다. 외부 배전선 사고에 대한 과전류 보호 계전기의 동작시간은 체계 변전소 배전선에 설치된 계전기의 실제 설정값을 기준으로 적용하였다.

A. 배전 계통 보호 기기

배전선에서 발생하는 사고를 검출하기 위하여 과전류 계전기 (51)와 지락 과전류 계전기 (51G) 및 저전압 계전기 (27)가 설치된다. 여기서 과전류 계전기는 주로 3상 과전류 단락 사고에 대한 보호 책무를 가지며 지락 과전류 계전기의 경우는 단상지락과 2선 단락 등 3상 불평형 사고에 대한 보호 책무를 가진다. 배전선에서의 과전류 계전방식은 통상 자구간의 주보호와 동시에 인접 구간의 후비 보호를 겸하므로 계전기 설정치 정정시 인접 구간의 계전기와와의 협조에 대해서 충분히 고려해야 한다.

B. 유도발전기의 운동 방정식

동기기와는 다르게 유도발전기는 외부 전원이 연결되어 있을 경우에만 전력을 생산할 수 있는 전원으로서 일정한 회전자 속도에 대한 유도기 내부의 전자기 토크 (T_e)는 식 1과 같이 전압의 제곱에 비례하여 형성 된다.

$$T_e = KsV^2 \quad (1)$$

여기서, K는 유도기 사양에 따라 결정되는 상수이며 s는 슬립을 나타내고 있다.

회전자의 동적 특성은 식 2와 같은 운동 방정식 (Swing equation)에 의하여 결정되며 입출력의 불평형은 회전체의 감속 또는 가속의 결과로 나타난다 [4][5].

$$J \frac{dw}{dt} = T_m - T_e \quad (2)$$

여기서, J는 회전자 관성 모멘트이고 T_m 은 기계적 토크, T_e 는 전자기 토크, w 는 회전자 속도를 의미하며, 식에서는 베어링 마찰, 풍손, 자기손실 등에 대한 계동토크는 고려하지 않았다. 유도 발전기의 경우 일정한 전자기 토크에 비하여 기계적 토크가 증가하거나 혹은 일정한 기계적 토크에 비하여 계통의 전압 강하로 인해 전자기 토크가 감소하는 경우에는 회전자들을 가속시키게 된다. 회전자의 가속은 식 2에서와 같이 기계적 특성을 결정짓는 회전자 관성 모멘트에 많은 영향을 받는다. 따라서 큰 용량을 갖는 유도 발전기의 경우 작은 용량의 발전기에 비하여 관성 모멘트가 크므로 심한 입출력 불평형에 대하여 오랜 기간 동안 안정된 상태로 운전될 수 있다.

C. 인접 배전선 사고에 대한 풍력단지의 운전 특성

인접 배전선 사고 시 유도 발전기의 운전 특성을 모의하기 위하여 다양한 사고 조건과 풍력발전단지의 출력 조건을 고려하였다.

그림 2와 3은 피더 C에서 모선으로부터 2.7 km 떨어진 3번 지점에서의 1선 지락사고와 2선 단락사고에 대한 계전점 전압과 전류 및 발전기 회전속도에 관한 모의 결과이다. 다음의 모의에서는 발전기의 출력을 최대로 가정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 배전선에서 사고가 발

생하면 계전기가 사고를 검출하여 차단기를 동작시킬 때까지 계전점의 전압은 급격히 감소하게 된다. 전술한 것처럼 이러한 계통의 전압강하는 풍력발전기의 회전자의 속도를 가속시키는 결과를 가져오게 된다. 1선 지락 사고와 2선 단락 사고에서도 사고전류가 최대부하전류를 기준으로 각각 900 %와 750%이상으로 증가하여 발전기의 회전자 속도가 일정 수준까지는 가속되지만 사고가 발생한 상 이외의 전압이 크게 감소하지 않으므로 사고 제거 시까지 발전기의 회전자 허용 최대 속도 1.1pu를 초과하지 않는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 사고조건에 대해서는 풍력발전기는 전자기 토크와 기계적 토크사이의 차이로 인하여 슬립이 증가하지만 회전자의 속도가 정상적인 슬립 영역 안에 위치하므로 정상적인 운전이 가능하다. 차단기 동작 시간은 피더 C에 설치된 과전류 계전기의 설정치를 이용하였다.

그림 4와 5는 1선과 2선사고와 같은 사고 발생 지점에서 3상 단락사고에 대한 모의 결과로서, 풍력발전단지의 출력조건에 따른 사고응답 특성을 살펴보기 위하여 풍력발전기의 출력을 각각 100%와 50%로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 3상 사고에 대한 모의 결과는 그림 2와 3과는 달리 배전용 차단기 동작 전에 발전기의 회전속도가 허용범위를 초과하므로 발전기가 출력을 멈추고 정지된다. 그림에서 알 수 있듯이 발전기의 회전속도가 허용범위를 초과하는 시점은 현재의 발전기 출력조건에 따라 달라지는데 100 %의 출력을 갖는 발전기는 사고 발생 후 0.25 초 만에 정지되며, 50 %의 출력을 갖는 발전기는 사고 발생 후 0.55초 후에 정지된다. 따라서 사고 발생시점에서 발전기의 출력이 크면 회전속도의 증가는 급격히 발생하며, 발전기의 출력이 작으면 그만큼 천천히 발전기의 회전속도가 증가하게 된다. 그림 5의 결과에서 살펴보면 배전용 차단기를 배전선 보호협조를 만족하면서 수 사이클 빠르게 동작시키면 외부배전선 사고에 대하여 풍력발전단지가 안정하게 운전될 수 있을 것이다.

풍력발전기의 사고 응답 특성에 중요한 영향을 미치는 다른 요소는 사고 위치이다. 모선으로부터 먼 지점에서 발생한 사고에서는 선로 임피던스의 영향으로 계전점에서의 전압 강하가 크게 발생하지 않으므로 풍력발전기의 회전자의 속도가 급격히 증가하지 않는 특성을 가진다. 반대로 모선에 가까운 사고는 모선 전압을 큰 수준으로 감소시키므로 풍력발전기의 회전자의 속도는 급격히 증가할 것이다. 사고 위치에 따른 풍력발전기의 운전특성을 살펴보기 위하여 모선으로부터 6 km 떨어진 지점에서 3상 단락 사고를 모의 하였으며 이에 대한 결과를 그림 6과 7에 나타내었으며, 풍력발전기의 출력은 각각 100 %와 50 %로 가정하였다. 사고 지점에 모선으로부터 멀리 떨어진 지점이므로 계전점에서의 전압강하는 심각하게 발생하지 않는다. 따라서 50 %의 출력특성을 갖는 풍력단지는 안정된 운전 특성을 나타내었다. 반면, 발전기 출력이 100 %일 경우에는 차단기 동작 이전에 발전기의 회전속도가 허용범위를 초과하였다.

2.3 적응형 과전류 계전 알고리즘

본 논문은 전용선으로 계통에 연계된 풍력발전단지의 안정된 운전을 위해 인접 배전선에 설치된 과전류 보호 계전기의 동작 시간을 사고 조건과 발전기의 출력조건을 고려하여 능동적으로 설정할 수 있는 적응형 보호 계전 알고리즘을 제안하였다.

A. 과전류 계전기의 특성 곡선

그림 8은 간선 C에 적용된 과전류 계전기의 TCC (Time-Current Curves) 특성 곡선이다. Region 1과 Region 2는 각각 3상 사고와 2상 단락사고에 따른 풍력발전기의 동적특성을 나타내는 구간을 표시한 것이다. 그림에서 단상 지락 사고의 경우는 사고 시 발전기의 출력 변화가 작으므로 나타내지 않았다. 사고 전류가 최대 부하전류의 150 % 이상부터 과전류 계전알고리즘이 동

작하며, 사고전류가 2000 %를 넘어가면 50 msec 이내에 차단기가 순시동작 하도록 설정되어 있다 [3].

B. TCC와 PDTC (Proper Delayed Time Curves)

그림 9와 10에서는 3상과 2상 사고 시 풍력발전기의 출력 상태와 사고 조건에 따라 풍력발전단지의 안정성을 보장할 수 있는 최소한의 사고 제거 시간을 나타내는 PDTC(Proper Delayed Time Curves)와 과전류 계전기의 TCC 특성 곡선을 나타내었다. PDTC는 외부 배전선 사고가 발생하였을 경우 이들이 제거되는 시간에 따라 발전기의 과도 특성은 변동하게 되는데, 배전선 사고에 대해서 PDTC 곡선 이하에서 사고가 제거되면 발전기는 안정된 운전특성을 갖는 것을 의미하며, 반대의 경우에는 발전기의 회전속도가 사고 제거 이전에 허용범위를 초과하여 발전기가 정지되는 것을 나타낸다. 그림에서 WT_{out} 은 풍력발전단지의 출력을 의미한다. 전철의 모의 결과에서 알 수 있듯이 TCC 곡선을 PDTC 곡선이 만나 는 지점을 기준으로, 보호협조를 고려하여 일정부분 낮추

면 전용선에 연계된 풍력발전기들이 외부 배전선 사고에 의하여 영향 받는 부분을 감소시킬 수 있을 것으로 판단 된다.

3. 결 론

본 논문에서는 전용선으로 배전계통에 연계된 풍력발 전단지의 안정적인 운전을 위한 인접 배전선의 적응형 보호 계전 알고리즘에 대하여 기술하였다. 적응형 보호 계전 알고리즘은 풍력발전단지의 출력조건과 인접 배전 선에서 발생한 사고 조건을 고려하여 배전선에 설치된 보호계전기의 동작시간을 조정하는 것으로, 배전선의 동 호협조를 고려하면서 TCC(Time-Current Curves)의 보 작영역을 PDTC(Proper Delayed Time Curves)를 기준 으로 재설정한다면 풍력발전단지가 외부 사고에 대하여 안정적으로 동작할 수 있는 영역을 큰 폭으로 확대시켜 지속적인 전력생산이 가능할 것이다.

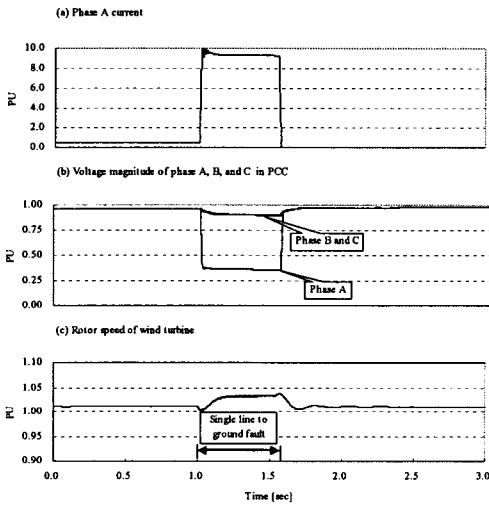


그림 2 1선 지락 사고 (풍력발전단지의 출력:100%)

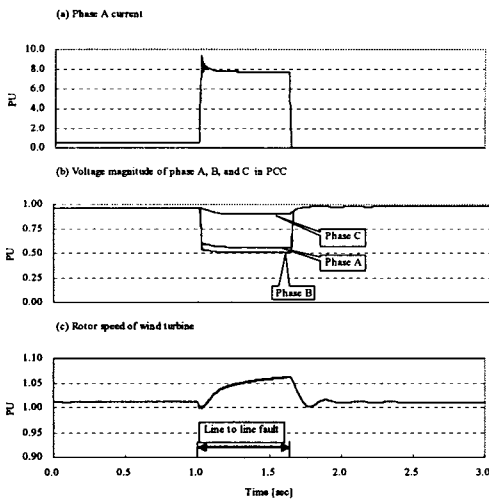


그림 3 2선 단락 사고 (풍력발전단지의 출력:100%)

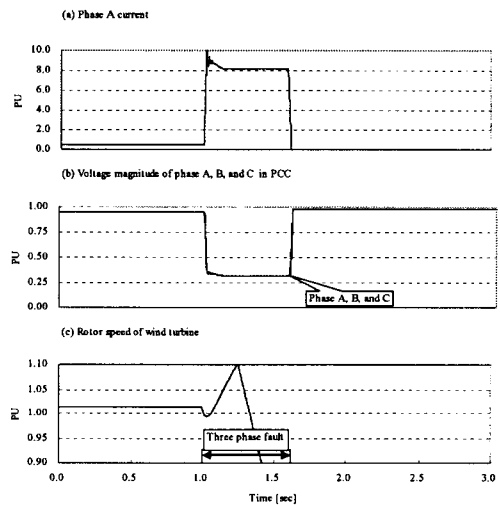


그림 4 3선 단락 사고 (풍력발전단지의 출력:100%)

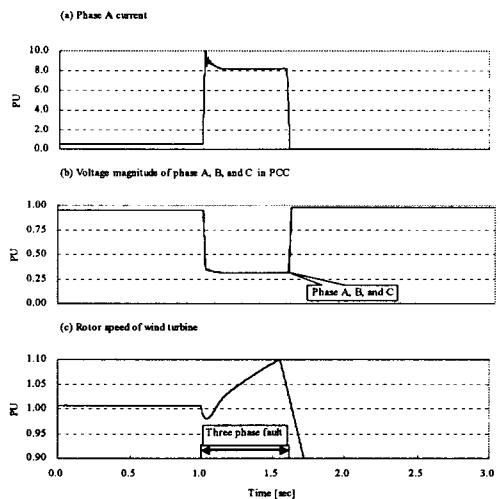


그림 5 3선 단락 사고 (풍력발전단지의 출력:50%)

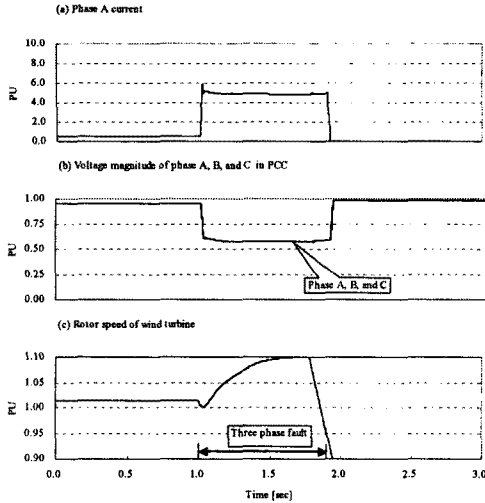


그림 6 6 km 3선 단락 사고 (풍력발전단지의 출력:100%)

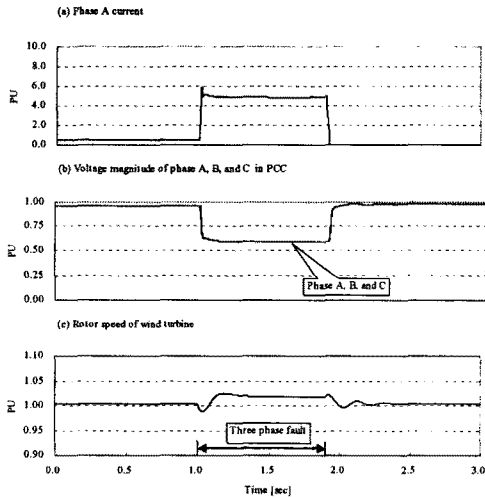


그림 7 6 km 3선 단락 사고 (풍력발전단지의 출력:50%)

감사의 글
본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

[참고 문헌]

- [1] Vestas Wind Systems A/S, "Technical report of wind turbine generators" 2001.
- [2] Manitoba HVDC Research Centre, "PSCAD/ EMTDC User's Manual." Canada 1986.
- [3] 한국전력공사, "변전설비 현장 Guide Book", 2001
- [4] H. K. Lauw and W. S. Meyer, "Universal Machine modeling for the presentation of electric machinery in an electromagnetic transient program." IEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, pp. 1342-1350, June 1982.
- [5] M. S. Sarma, "Electric Machines, Steady-State Theory and Dynamic Performance." West Publishing Company, 1985.

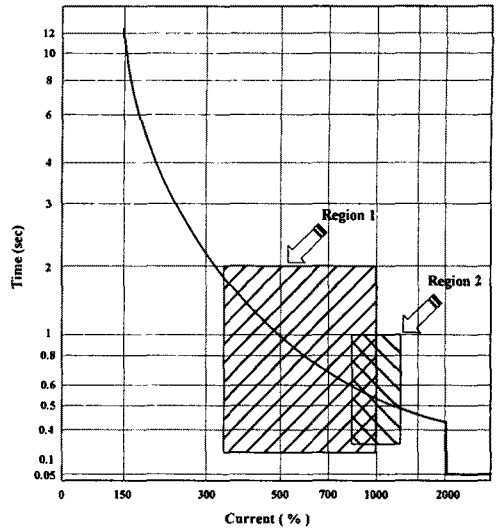


그림 8 8 km 3상 C에 적용된 과전류 계전기의 특성 곡선

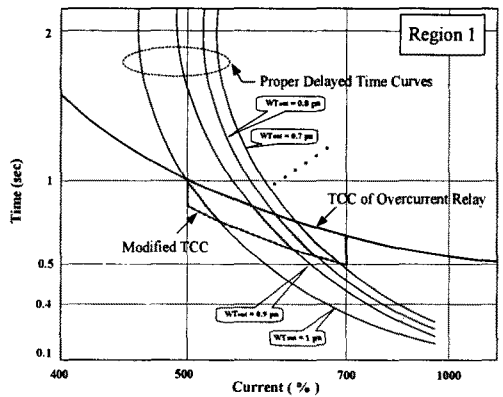


그림 9 3상 사고에 대한 TCC 와 PDTC

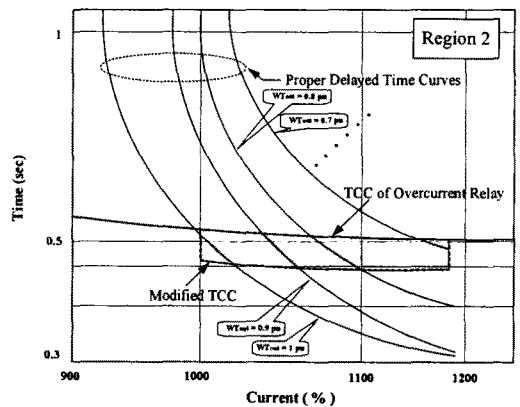


그림 10 2상 사고에 대한 TCC 와 PDTC