

# 시스템 기반 접근방식을 이용한 모선 차동보호의 자동 테스트

Christopher Pritchard | OMICRON electronics  
Product Management  
Klaus, Austria  
christopher.pritchard@omicronenergy.com

**개요** — 송전선과 배전 변전소에서 나타나는 높은 단락전류 사고를 방지하기 위해 모선 보호방식이 사용되고 있습니다. 모선 정전을 예방하기 위해 모선 보호의 빠른 속도와 높은 안정성이 요구됩니다. 변전소 내의 서로 다른 모선 위상, 구성, 보호 동작의 논리는 독특합니다. 정확한 성능을 보장하기 위해서는 커미셔닝 중에 전체 모선 보호장치를 시험하는 것이 필수적입니다.

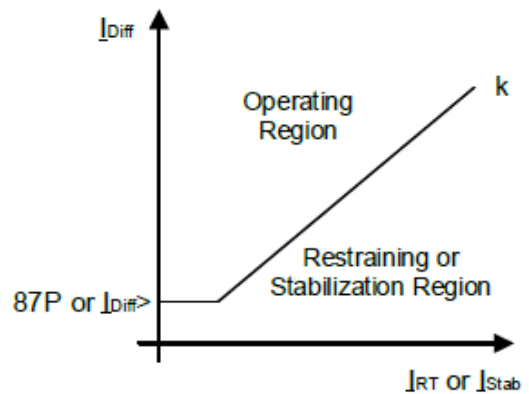
다중 모선, 모선 커플러 및 베이로 구성된 복잡한 모선 토폴로지를 위한 모선 보호 테스트 및 검증은 커미셔닝을 위한 가장 어려운 작업 중 하나였습니다. 단일 테스트 장비에 의한 단일 테스트는 보호장치의 정확한 작동을 위한 충분한 신뢰성을 제공하지 못합니다. 모든 단로기 구성을 가진 전체 모선 토폴로지를 모델링하는 시스템 기반 접근방식을 사용하면 검증이 중요한 모든 고장 시나리오에 대해 새로운 가능성을 제공합니다.

이 논문은 새로운 테스트 접근법과 발견된 오류를 사용하여 전 세계의 다른 유틸리티 업체들의 경험을 공유할 것입니다.

**키워드**— 모선 보호 테스트, 시스템 기반 테스트

## I. 차동 요소 테스트

모선 보호의 주요 보호 기능은 차동 요소에 의해 이루어지며, 차동 요소는 Kirchhoff의 법칙을 적용하여 해당 영역 내의 고장을 식별합니다. 차동 요소 측정은 대개 그림 1 과 같이 백분율 특성으로 안정화됩니다.



$$I_{RT} = |I_1| + |I_2| \dots + |I_3|$$

$$I_{diff} = |I_1 + I_2 \dots + I_n|$$

그림 1: 특성 곡선

테스트는 특성을 시각화할 수 있으며, 소프트웨어 모듈은 평면 내에 샷을 배치함으로써 테스트에 대한 전류를 계산하고 그에 따라 트립 또는 트립 없음 여부를 평가합니다. 테스트 세트는 2 개의 베이 유닛에서 3 상 전류를 각각 인가합니다.

그러나 이러한 특성을 테스트하는 것은 모선 보호에서 어려울 수 있습니다. 모선의 선택적 보호를 달성하기 위해 보호 장치는 단로기 위치에 따라 모선 토폴로지를 고려해야 합니다. 높은 신뢰성을 보장하기 위해 픽업해야 하는 추가 체크 존이 적용됩니다. 체크 존 (Check Zone)은 모든 베이의 변류기를 포함하는

하나의 영역을 가진 추가 차동요소 입니다. 체크 존은 단로기 영역에 독립적입니다. 과도한 안정화를

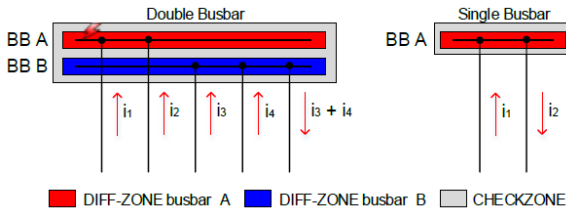


FIGURE 2 DIFFERENT BUSBAR ZONES

방지하기 위해 체크 존에는 특수 시험 설정이 필요한 특수 논리를 적용하며, 여기서 1 개의 3 상 전류가 2 개의 베이로 순환되고, 2 번째 베이에 2 개의 상 전류를 인가합니다. [2] 또한 모선 선택 요소와 체크 존 요소가 겹칩니다. 각 특성 설정을 쉽게 테스트하기 위해 테스트 중에 요소를 비활성화 하거나 테스트 접점을 사용합니다. 우리는 이것을 매우 위험한 접근 방식으로 여깁니다. 보호 논리가 일관되지 않은 상태로 작동할 때 실제 보호 논리를 검증할 수 없는 잠재적 위험이 있습니다.

지금까지 그러한 설정 기반 테스트는 소자와 릴레이가 주어진 설정에 따라 올바르게 작동하는지 확인할 수 있습니다. 하지만 여기까지만 테스트하면 모선 보호의 복잡성에 미치지 못할 것입니다. 테스트 시 특별한 주의가 필요 :

- 차단 실패(BF) 및 데드존 고장 감지 등의 논리 기능
- 단로기의 올바른 구성
- 전체 보호 기능 포함 및 모든 기능이 함께 작동
- 모든 전류는 올바른 CT 비율로 작동
- 베이, 피더 및 백업 보호와의 조정

이러한 영역의 잠재적 문제는 대개 논리, 설정 및 설계 오류로 분류됩니다. 연구에 따르면 [3] 보호에 있어 이것이 가장 일반적인 오류 원인임을 나타냅니다. 보호 시험은 항상 정확성과 신속성 사이에 적절한 균형을 찾아야 하기 때문에, 오류가 발생할 가능성이 높은 시험에 집중하는 것이 중요합니다. 따라서 모선 보호에 필수로 시스템 기반 시험을 제안합니다.

## II. 시스템 기반 테스트

설정 기반 시험은 주어진 설정에 따라 릴레이의 요소와 기능을 검증합니다. 반대로 시스템 기반 테스트는 보호 시스템이 실제 전력 시스템 조건에서 올바르게 작동하는지 검증합니다. 고장 또는 시스템 조건으로 전력 시스템 시뮬레이션을 통해 계산하고 출력합니다. 이 방법으로 논리 및 설정을 가진 보호계통이 그들이 설계한 전력계통에 실제로 동작하고 있는지 확인합니다. 또한 시스템 기반 시험 시험 준비, 실행 및 문제 해결에서 많은 시간을 절약합니다.

모선 토폴로지는 다양하기 때문에, 모선 보호 시스템의 적용 또한 독특합니다. 올바르게 작동하려면, 모선 보호는 작동 중인 모든 베이, 커플러, 토폴로지 및 단로기 위치를 알아야 합니다. 따라서 시험 시스템은 단로기 상태의 모든 바이너리 상태와 다른 베이 전류를 일관된 방식으로 전체 모선 시스템을 모방해야 합니다. 예를 들어, 해당 전류 경로 내에 전류가 모두 차단기 회로가 닫혀 있을때만 측정됩니다. 그렇지 않으면 측정, 단로기 상태 감시 및 차단기 고장 기능과 같은 보호가 실제 조건에서 작동하는 것과 달라지며 시험이 불합격 됩니다.

이상적인 전류는 모든 베이에 동시에 인가되지만, 베이에 따라 테스트 세트의 수량이 항상 사용 가능한것은 아닙니다. 2 개의 6 상 테스트 세트가 있다면, 3 개의 공급 베이와 1 개의 연결 베이에 인가할 수 있으므로, 대부분의 시험 케이스를 실행할 수 있습니다. 모든 공급 베이이 성공적으로 통과한 후, 테스트 세트를 다음 베이 유닛에 연결할 수 있습니다. 변전소 설계에 따라 분산 보호의 경우 베이 유닛이 서로 몇 미터 떨어져 있을 수 있습니다.

- 단로기 상태 시뮬레이션
- 각 시험 단계 및 시험 순서의 상태에 대한 모든 시험 전류 계산
- 시간 동기화된 테스트 세트 제어

시스템 기반 솔루션이 없으면 스프레드시트를 설정하여 이를 달성하는 경우가 많습니다. 각 행 또는 테스트 단계에는 단로기 상태와 베이 전류를 정의하는

여러 열이 있습니다. 실행 시, 단로기 위치는 베이 유닛에서 바이너리 접점을 브리징하거나 맞춤형 배전반을 사용하여 현재 행에 따라 모방됩니다. 여러 테스트 세트의 경우 전류를 하나 이상의 시퀀서 파일로 전송합니다. 이러한 스프레드시트를 만들고 실행하려면 시간이 많이 걸릴 수 있습니다. 이 노력은 모선의 크기에 따라 기하급수적으로 증가합니다. 또한 이러한 스프레드시트는 잘 이해되지 않습니다. 일반적으로 엔지니어가 실제 시나리오를 스프레드시트로 변환하여 준비합니다. 만약 다른 사람이 시험 단계를 이해하려고 한다면, 다시 머리 속에 있는 실제 시나리오로 변형해야 합니다. 이러한 마인드 맵핑은 비효율적이고 잠재적 오류의 원천입니다.

시스템 기반 테스트 도구는 하나의 해결책이 될 수 있습니다. 전력 시스템을 모델링하기 위해 CT 비율과 피더의 단락전류를 포함한 모든 토폴로지를 단일 라인 에디터로 구성할 수 있습니다. 시험 케이스를 정의하는 것은 한 줄 이내로 이루어질 수 있습니다.

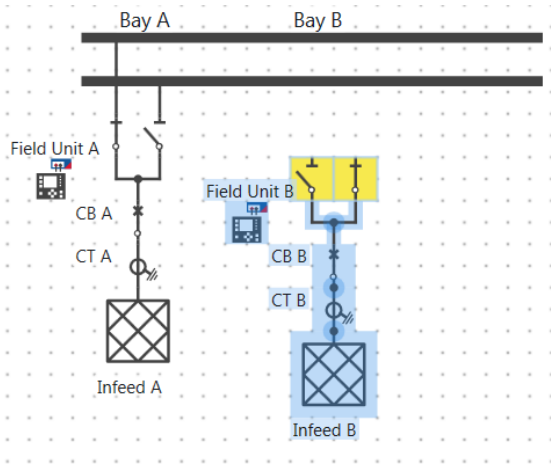


FIGURE 3: 단일 라인 에디터

#### A. 단로기 시뮬레이션

시험 케이스 내에서 단로기는 편집기를 통해 직접 작동할 수 있습니다. 또한 시스템 기반 테스트 솔루션은 차단기의 위치를 테스트 세트의 바이너리 출력에 매핑할 수 있습니다. 테스트 단계가 실행되기 전에 SW 는 정의된 차단기 위치에 따라 테스트 세트의 모든 바이너리 출력을 설정합니다. 이렇게 하면 모든 시험 전에 수동으로 단로기 접촉을 브리징할 필요

없이 자동화하여 오류를 줄이고 효율성을 높일 수 있습니다. 모든 단로기를 시뮬레이션 하는 경우 많은 출력이 필요합니다. 따라서 테스트 세트는 약세사리를 통해 바이너리 출력을 확장할 수도 있습니다.

#### B. 전류 계산

전류의 계산은 간단하고 정확합니다. 전력 시스템 시뮬레이션은 부하 흐름을 변경하고, 고장을 배치하고, 차단기 이벤트를 추가함으로써 모든 CT 위치에 대한 전류를 계산합니다.

#### C. 여러 개의 테스트 세트를 동시에 작업

전류 신호가 계산되면 하나 또는 여러 개의 테스트 세트로 전송됩니다. 그 후 SW 는 실행 시작시간을 설정합니다. 모든 장비는 동기화되므로 동시에 작동합니다. 실행된 후, 측정된 접점 이벤트를 SW 로 보내며, 평가됩니다. 이 모든 단계는 하나의 SW 로 이루어지며, 실행버튼을 누르기만 하면 됩니다. 필요한 테스트 세트당 사용자의 조정이나 별도의 문서가 필요 없습니다.

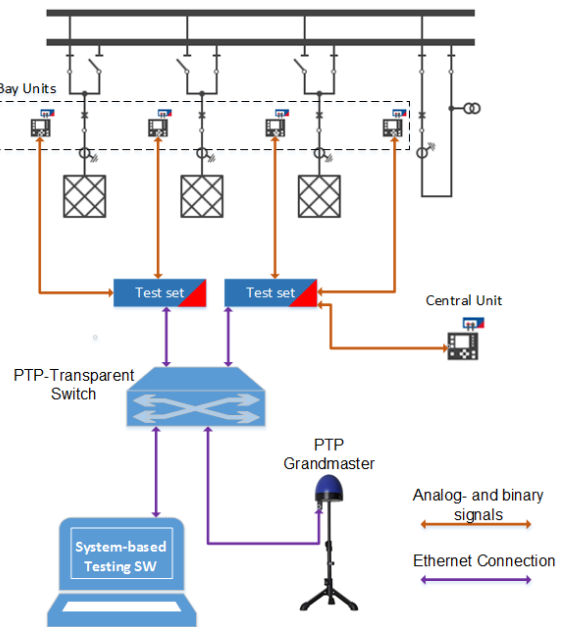


FIGURE 4 시스템 기반 모션 보호 테스트를 위한 테스트 설정

여러 테스트 세트로 작업할 때에는 시간 동기화가 필요합니다. 동작이 지연될 때마다 전류 사이의 위상 이동이 발생하며, 이는 정상적인 부하 흐름에도 차동

요소를 트립시킬 수 있습니다. 모든 테스트 세트에 대해 GPS 안테나의 복잡한 설정을 피하기 위해, 테스트 세트를 PTP 지원 이더넷 네트워크에 연결합니다. 이 설정에는 특수 스위치에 연결된 하나의 PTP 마스터 시간 소스만 필요합니다. 여기서 시간은 모든 테스트 세트로 분배됩니다. 동시에 네트워크는 시스템 기반 시험 소프트웨어와 테스트 세트 간의 통신에 사용될 수 있습니다.

#### D. 복잡한 논리 시퀀스 테스트

많은 테스트 단계에서 보호 논리를 확인하는 것이 중요합니다. 트립 명령이 전송되면, 차단기는 시뮬레이션 내에서 열려야 하며, 어떤 전류 흐름도 시뮬레이션 되지 않아야 합니다. 또한 시뮬레이션은 다시 진행되어야 합니다. 그렇지 않으면, 첫번째 트립 후에 차단 실패 논리로 간주될 것입니다. 시험 대상 시스템의 명령에 따라 반응하는 시뮬레이션 능력을 보통 실시간 폐쇄 루프 동작이라고 합니다. 그러나 실시간 시뮬레이션 시스템은 실험실에서만 적합하고,

전문적인 지식과 투자가 필요한 반면, 이 SW는 간단히 구성될 수 있습니다. 모션 고장이 있는 시뮬레이션에 이 알고리즘을 적용하면 CB 명령 없이 첫번째 반복 인가가 됩니다. 그럼에도 불구하고 보호 장치는 소프트웨어에 의해 기록된 트립 명령으로 고장에 응답합니다. 우리는 릴레이가 이전 인가와 동일한 전류 파형에 의해 동일한 트립시간으로 응답해야 한다고 가정하기 때문에, 예상 트립 직후부터 차단기 열기 이벤트와 같은 전류 파형을 처음부터 인가할 것입니다. 이전 시뮬레이션에 포함되지 않은 다른 트립 또는 근접 명령이 전송될 때, 두 개의 차단기 이벤트를 포함하여 세번째 반복이 실행됩니다. 이 알고리즘은 보호에 의해 알려지지 않은 새로운 트립이나 닫힘 명령이 전송되지 않을 때까지 계속됩니다. 그러면 마지막 반복은 실시간 시뮬레이터와 유사한 결과를 얻습니다. 이것을 사용함으로써, 얻을 수 있는 이점은 논리를 시험하기 간단하다는 것입니다. 고장을 배치한 후 반복 폐쇄루프로 이어집니다.

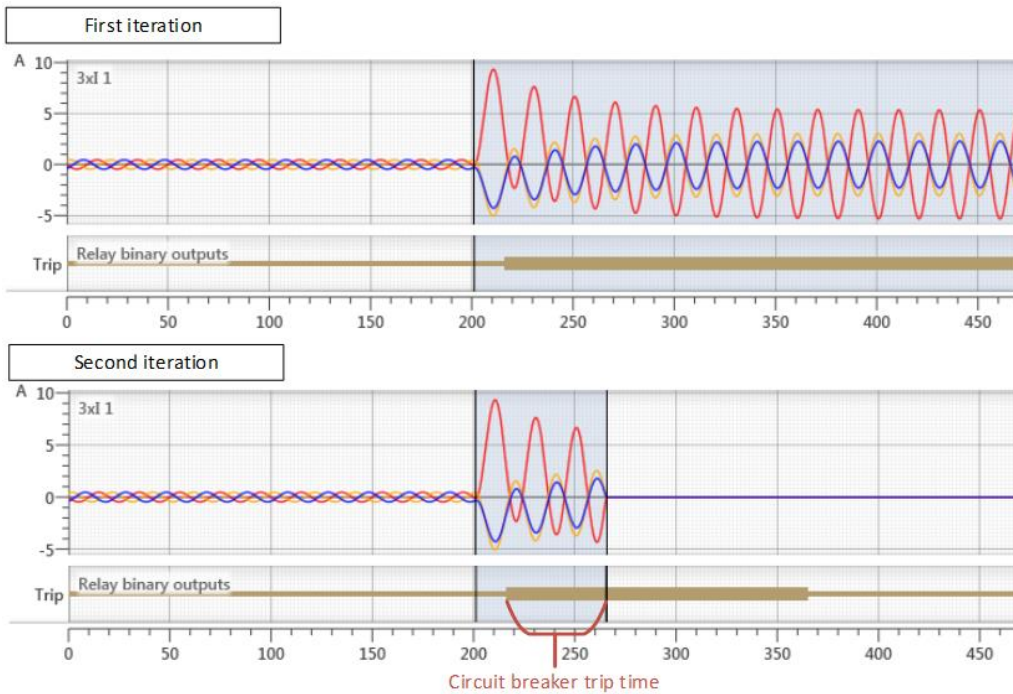


그림 5: 폐쇄 반복루프의 예시

### III. 실제 세계 사례

지난 3 년동안 우리는 [4]와 [5]에 기술된 시스템 기반 테스트 솔루션으로 모선 보호 경험을 많이 수집했습니다. 이 논문에서는 시스템 기반 테스트의 중요성을 강조하고자 하므로, 몇 가지 현장 테스트 중에 발견된 오류를 요약합니다. 대부분의 경우 시스템 기반 접근방식은 엔지니어 또는 기술자에 의해 사용되었으며, 해당 톨이 없었다면 대부분의 오류는 발견되지 않았을 것입니다. 여기서 설명하는 모든 오류는 기존의 테스트에서도 확인할 수 있지만, 전용 시스템 기반 테스트 솔루션은 구성의 단순성과 품질 부분에서 더 우수한 것을 경험했습니다. 테스트 케이스를 생성하고 실행하는 것이 이렇게 쉽기 때문에, 테스트 엔지니어는 더 많은 테스트를 수행할 수 있습니다.

#### A. 데드 존의 오류

커플링 배이의 100% 선택성에 대해서는 일반적으로 CB의 각 측면에 두 개의 CT가 설치되어 모선 선택구역이 겹칩니다. 종종 경제적인 이유로 CT와 CB 사이에 데드 존을 생성하는 CT만 설치됩니다. 현대의 모선 보호장치에는 커플링 장치 CB의 상태 비트를 측정하여 데드 존 내의 고장을 감지하는 특별한 논리가 있습니다. 이중 모선 토폴로지에 대한 모선 보호를 시행하기 위해, 커플링 장치 CB가 열려 있는 동안 정지 구역의 고장이 모선 B의 순시 트립으로 이어진다는 것을 검증해야 한다는 테스트 케이스가 정의되었습니다. (CB가 닫히면 모선 A가 트립되고 모선 B가 트립됨) 보호 장치가 시험 내에서 선택성을 보장하지 못했고, 이 오류는 모선 보호 설정 내에서 해결되었습니다.

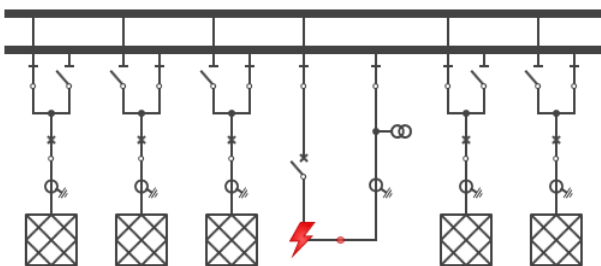


FIGURE 6: FAULT IN DEAD-ZONE

#### B. 커플링 배이에 있는 두 개의 필드

다음 오류는 추가 전송 모선이 있는 이중 모선 토폴로지에 대한 분산 모선 보호에서 발견되었습니다. 첫번째 배이 유닛에 제한된 입력으로 인해 두 번째 배이 유닛이 커플링 배이에 설치되었습니다. 커미셔닝 중에 데드 존 결함이 있는 테스트 케이스는 초기에 실패하였습니다. 구성으로 인해 두 배이 유닛은 CB 상태 비트를 제공해야 했지만, 오직 하나의 배이 유닛에서 CB 상태 접점에 연결되었습니다. 이 문제는 CB 상태 접점을 두 번째 장치에 연결하여 해결되었습니다.

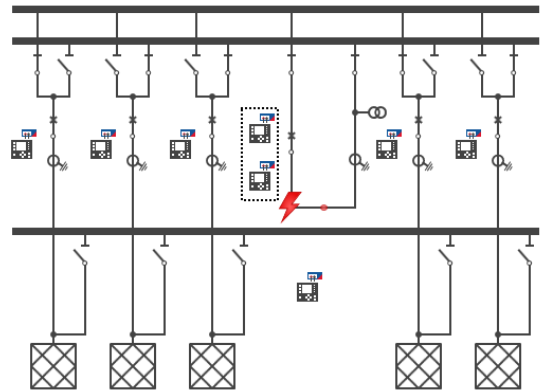


FIGURE 7: 커플링 배이에 있는 두 개의 배이

#### C. BF 명령의 원치 않은 트립

다음 오류는 실험실에서 보호 개념을 검증하는 동안 발견되었습니다. 테스트 대상 시스템은 저임피던스 모선 보호와 전용 피더 보호 계전기로 구성되었습니다. 테스트 사례에서 차동 영역 외부의 고장을 인가했습니다. 이 고장은 피더 보호 장치로 처리해야 하지만, 모선 보호 장치는 피더 픽업 시 즉시 내부 BF 타이머를 시작했습니다. 시스템 기반 테스트는 CB 트립 지연도 시뮬레이션했기 때문에, BF 타이머 설정에 안전 여유가 충분하지 않아 모선이 선택적이지 않은 트립으로 이어질 수 있다는 것이 밝혀졌습니다.

## V. 참고 문헌

- [1] G. Ziegler, Numerical Differential Protection: Principles and Applications, Erlangen: Publicis Publishing, 2012.
- [2] Siemens, SIPROTEC 7ss52x Manual, Siemens, 2004.
- [3] Protection System Misoperations Task Force, "Misoperations Report," North American Electric Reliability Corporation (NERC), Atlanta, 2013.
- [4] C. Pritchard and T. Hensler, "Test and verification of a busbar protection using a simulation-based iterative closed-loop approach in the field," in *Australian Protection Symposium*, Sydney, 2014.
- [5] F. Fink, J. Köppel and T. Hensler, "Effective commissioning of bus bar protection systems using a dynamic simulation in the field," in *Development in Power System Protection 2016 (DPSP)*, Birmingham, 2016.

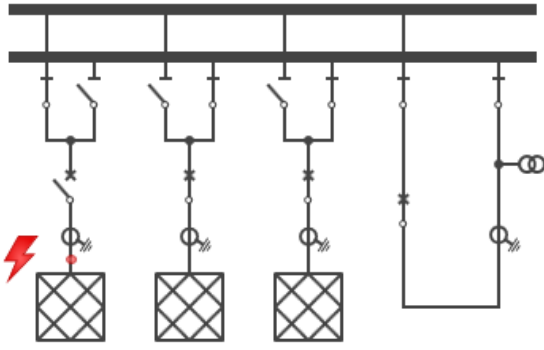


FIGURE 8: 외부 고장

### D. 잘못 결선된 중성선 전류 입력

분산 네트워크의 이중 모선에 대한 모선 보호에서 다음 오류가 발견되었습니다. 전력 시스템은 저 임피던스 접지 방식으로 작동되어 위상 간 고장에 대한 작은 전류가 발생하였습니다. 기본 차동 요소 내에서 그러한 작은 고장 전류는 전체 3 상 부하 전류로 지나치게 제한될 것입니다. 유틸리티는 중립 전류  $I_N$  에 대한 전용 백분율 제한 특성이 있는 모선 보호를 선택하여 문제를 해결했습니다.  $I_N$  은 Holmgreen 회로에 연결된 별도의 전류 입력을 통해 측정되었습니다. 시스템 기반 테스트 케이스에 따르면 외부 위상 대 접지 고장은 선택적이지 않은 모선 트립을 유발했습니다. 이는  $I_N$  의 전류 입력의 극성이 잘못되었기 때문입니다. 이전의 비 시스템 기반 테스트에서는 각 베이에만 단일 전류를 인가했으므로 이 오류를 발견하지 못했습니다.

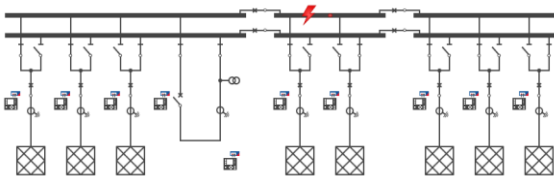


FIGURE 9: 중간 구간에서의 모선 고장

## IV. 결론

현장에서 발견된 오류는 시스템 기반 테스트가 현대의 모선 보호 테스트에 필수라는 것을 증명했습니다. 전용 시스템 기반 테스트 솔루션은 이러한 테스트 수행을 크게 단순화 시킬 수 있습니다.

OMICRON은 혁신적인 테스트 및 진단 솔루션으로 전력 산업에 서비스를 제공하는 국제 기업입니다. OMICRON 제품의 적용으로 사용자는 시스템에 있는 고전압/저전압 설비의 상태를 완벽하게 평가할 수 있습니다. 컨설팅, 커미셔닝, 테스트, 진단 및 교육분야에서 제공되는 서비스는 제품을 보다 완벽하게 만듭니다.

160여 개국의 고객들은 이미 OMICRON의 우수한 품질과 첨단 기술 제품을 선택하였습니다. 모든 대륙에 있는 서비스 센터는 폭넓은 지식 기반과 함께 고객 지원을 제공합니다. 이 모든 것들이 OMICRON을 전력 산업에서 시장 선두주자로 만들었습니다.

자세한 정보, 추가 자료 및 전 세계 사무실의 연락처 정보는 당사 웹사이트를 방문하십시오.