

이더넷 통신기반의 자율적 고장 판단 및 복구 방법론 연구

논 문

58-9-4

The Self-Fault Determination and Restoration Methodology based on the Ethernet Communication

고 윤 석* · 이 서 한* · 최 현 철* · 신 재 현*

(Yun-Seok Ko · Seo-Han Lee · Hyun-Chul Choi · Jae-Hyun Shin)

Abstract - This paper proposes an autonomous fault determination, fault zone isolation and fault restoration strategy based on the ethernet communication as a new attempt to solve the problem of the existing central control method. In proposed method, The FRTU(Feeder Remote Terminal Unit)s on the feeder determines autonomously where the faulted zone is by exchanging the voltage and current information with neighbor FRTUs based on the network communication, and then separates the faulted zone in an nil-voltage status to make the protective device to reclose successively. In particular, the minimization of outage time and relational load balancing is archived by each interconnection switch which determines autonomously the load zone to be allocated among those zones after the sound outage zones was separated individually. Finally, to show effectiveness of the proposed fault restoration strategy, the several fault cases are simulated for the test distribution system, and the load balancing index of the proposed solution is compared with all of feasible solutions.

Key Words : Self-Fault Isolation, Self-Fault Restoration, Ethernet Communication, Distribution System

1. 서 론

배전계통은 고밀도 부하지역은 물론, 염해지 등을 직접적이고 폭넓게 경유함으로써, 자동차 추돌, 나무 접촉 등 다양한 원인에 의해서 고장에 노출된다. 이때 고장을 신속하게 차단하지 못하면 화재와 인명피해는 물론, 배전 시스템이 붕괴됨으로서 심각한 정전피해를 경험하게 된다. 그러므로 고장을 차단할 수 있는 CB나 리클로저 등 보호기기가 변전소 인출 단이나 선로 상에 설치되며, 보호기기들 간의 선로상에는 정전구간을 최소화하기 위해 개폐기들이 설치된다.

일단, 보호기기에 의해서 고장이 차단되면 배전자동화시스템(DAS : Distribution Automation System)의 원격 감시 제어 기능을 활용, 선로상의 보호기거나 개폐기들을 원격에서 제어, 고장구간을 분리한 후, 부하 역송을 시도함으로써 정전구간을 최소화한다[1]. 그러나 기존 배전 자동화 시스템에서는 영구고장이 발생하는 경우, 보호기기가 영구 개방된 후, 고장구간을 분리하고 복구를 시도한다. 따라서 보호기기와 고장 구간 사이의 부하구간은 불필요한 정전을 경험하게 된다. 특히 중앙제어장치가 선로상의 FRTU(Feeder Remote Terminal Unit)들로부터 고장정보를 수집, 계통 운영자가 이들 정보를 바탕으로 고장구간을 판단하고 원격에서 개폐기

를 순차적으로 조작하여 고장구간을 분리, 건전 정전구간을 타 배전선로들로 절제 함으로서 고장구간 분리 및 복구에 상당한 시간이 요구되는데[2-4], 이 고장복구시간 지연문제는 피할 수 없는 문제이고 반드시 개선되어야 할 문제이다. 최근 배전계통은 초고속 대용량 통신이 가능한 이중화된 광네트워크 시스템으로 바뀌고 있으며, 이를 기반으로 분산, 자율 그리고 적응제어 개념을 배전계통에 적용, 지능화된 FRTU를 중심으로 중앙제어방식의 문제점을 해결하기 위한 노력들이 시작되고 있다[5-7]. 특히, 참고문헌 [8]에서는 FRTU간 통신을 통한 HIF(High Impedance Fault) 구간을 분리하는 방법론을 제안한다.

따라서 본 연구에서는 기존 중앙제어방식의 고장 복구 시 문제점을 해소하기 위해 새로운 시도로서 이더넷 통신기반의 자율적 고장 복구 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법론에서 각 FRTU들은 네트워크 통신을 기반으로 부하 단 FRTU들과 자율적으로 PtP(Peer to Peer) 통신을 시도, 전압, 전류 등 부하정보를 교환, 고장구간을 판단하도록 설계한다. 그리고 보호기기가 재 폐로에 성공하도록 적절한 시점의 무전압 상태에서 고장 구간이 자율적으로 분리되도록 하며, 정전 무 전압 경험 개폐기들이 개방되어 분하분할이 이루어지도록 제안한다. 끝으로, 각 연계 개폐기 FRTU들이 자기의 부하영역들을 자율적으로, 동시적으로 결정하도록 함으로서 정전시간을 최소화함은 물론, 합리적인 범위 내에서 부하 균등화가 얻어지도록 한다. 제안된 자율적 부하영역 전략의 유효성을 보이기 위해서 가공 및 지중선로로 구성되는 시험 배전 시스템에 대해서 수개의 고장이 모의되고 부하 균등화 정도가 비교된다.

* 교신저자, 정회원 : 남서울대학 전자공학과 교수 · 공박

E-mail : ysko@nsu.ac.kr

* 준 회 원 : 남서울대학 전자공학과 학사과정

접수일자 : 2009년 5월 25일

최종완료 : 2009년 6월 22일

2. 네트워크 통신 기반 배전계통 모델링

2.1 이더넷 통신 기반 배전계통 구성

최근 배전계통은 빠른 속도로 유비쿼터스 기반 시스템으로 진화하고 있다. 배전계통은 기존 동축 케이블 망 대신, 초고속 대용량 통신이 가능한 이중화된 광 네트워크로 바뀌고 있으며, FRTU는 이러한 이더넷 기반 고속 통신망에 적합한 구조로 업데이트되고 있어 조만간 DAS는 물론 선로상의 FRTU들 간에 자유로운 정보교환이 가능한 시대가 도래할 것이다. 그림 1은 이더넷 기반 초고속 네트워크를 기반으로 하는 배전 시스템을 보인다. 그림에서는 A/S는 자동화 개폐기를 의미한다.

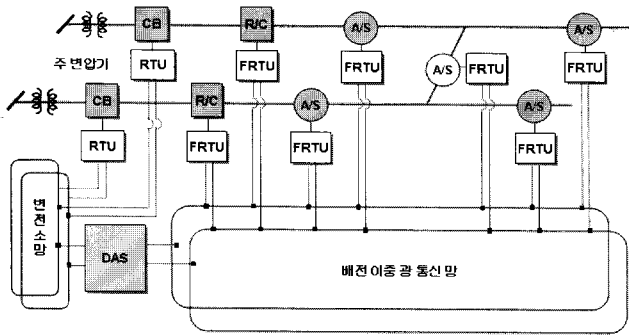


그림 1 이더넷 기반 배전 계통 구성
Fig. 1 Ethernet-based distribution system configuration

그림 1에서 DAS, 차단기(CB)의 RTU 그리고 리클로저(R/C) 및 자동화 개폐기(A/S)들의 FRTU들이 광 통신망을 기반으로 이중으로 연결되기 때문에 FRTU가 전기적 연결성을 추적할 수 있도록 모델링된 데이터를 보유하는 경우 상호간은 물론, DAS와 FRTU, 보호기와 FRTU간의 자유로운 고장 및 부하정보 교환이 고속으로 가능하다.

2.2 네이버 존(NeighborZone)모델링[8]

이더넷 통신을 기반으로 FRTU간 통신이 가능하기 위해서는 각각의 FRTU가 주위 FRTU들과의 전기적 연결성 정보를 보유해야 하는데, 이를 위해서는 새로운 배전계통 모델링이 요구되며, 특히 최소화된 데이터가 FRTU에 입력되도록 설계돼야 한다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해서 최소화된 맵인 네이버 존(Neighbor Zone)이 정의된다. 그림 3은 개폐기 S₆에 대한 네이버 존의 정의를 설명한다.

네이버 존은 속성, 요소속성 데이터를 가진다. 먼저, 각 개폐기는 2개의 네이버 존과 관계되는데, 전원 쪽 네이버 존의 속성을 "Source" 부하 쪽 네이버 존의 속성을 "Sink"로 정의한다. S₆의 경우 전원 쪽 네이버 존 {S₁, S₂, S₃, S₄, S₆}의 속성을 "Source", 부하 쪽에 있는 네이버 존 {S₆, P_{7,1}}의 속성을 "Sink"로 정의한다. 다음, 네이버 존의 각 요소들은 전원 개폐기를 확인하기 위해 요소속성을 가진다. 예를 들어, 개폐기 S₆의 Source 네이버 존 {S₁, S₂, S₃, S₄, S₆}의 모

든 요소들에 대해 요소속성이 표시되는데, S₁이 요소속성으로 "Source", 나머지 요소 {S₂, S₃, S₄, S₆}의 모든 요소들은 요소속성으로 "Load"를 가진다.

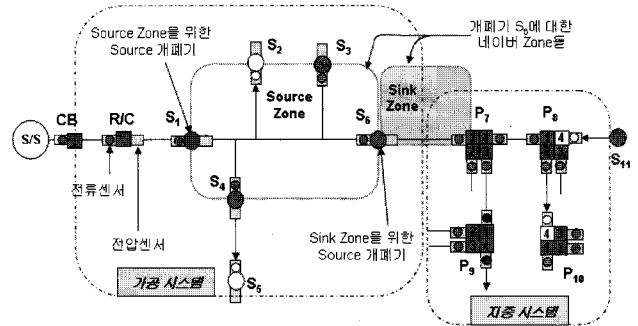


그림 2 그림 2 개폐기 S₆에 대한 네이버 존 모델링
Fig. 2 Neighbor zone modelling for a switch S₆

반면에 그리고 Sink 네이버 존의 {S₆, P_{7,1}} 요소들 중 S₆가 "Source" 속성 그리고 나머지 요소들이 "Load" 속성을 가진다. 사고정전이나 작업정전 시 정전 존의 부하 존들은 정전을 피하기 위해 다른 선로로 절체 되는데 이때, 절체되는 부하 존들은 전류변화를 경험하기 때문에 존의 속성과 요소속성이 변화된다.

그림 2에서 개폐기 양단의 □는 전압 감지기를 표시하는데, 상별(A,B,C상) 전압 감지기를 단일 감지기로 표시한 것이다. 반면에 □안의 ○는 전류 감지기를 표시하는데, 상별(A,B,C,N상) 고장전류 감지기를 단일 고장 전류 감지기로 표시한 것이다. 전압 감지기로부터 정상전압 또는 무전압 상태를 감지한다. 반면에 전류 감지기로부터는 순송, 역송, 무전류, 고장전류를 감지한다.

3. 자율적 고장구간 판단 및 분리 전략

선로 상에 고장이 발생한 경우, 고장전류를 경험한 선로상의 FRTU들은 자율적으로 1:1 통신을 기반으로 네이버 존의 FRTU들로부터 전압, 또는 전류 RMS 값을 수집한 후, 이들 데이터를 기반으로 고장구간 여부를 판단함으로써 기존 고장구간 판단의 신뢰성과 신속성을 크게 제고할 수 있다. 여기서 HR은 휴리스틱 규칙(Heuristic Rule)을 의미한다.

3.1 고장구간판단전략

상 또는 지락전류가 상 또는 지락 픽업 전류를 초과하는 경우로서 HR 1-2)에 근거하여 고장구간을 자율적으로 신속하게 판단할 수 있도록 한다.

HR 1] 고장전류를 경험하고 Sink 존의 요소들 중 임의의 요소가 무전압을 경험하면 고장으로 판단하고 그 Sink 존을 고장구간으로 한다. 일반적으로 단선을 수반하는 지락사고인 경우 Sink 존의 동일 상이 무전압을 경험하기 때문에, 고장구간 여부를 정확하게 판단할 수 있다.

HR 2] 고장전류를 경험하고 Sink 존의 모든 요소가 고장 전류를 경험하지 않은 경우 그 Sink 존을 고장구간으로 판단한다. 일반적으로 고장 구간의 Sink 존의 요소들은 고장 전류를 경험하지 않기 때문에 이 규칙을 적용하면 고장구간을 정확하게 판단할 수 있다.

3.2 고장구간분리전략

일반고장(LIF)의 경우 보호기기는 정해진 순시(F), 지연(D) 동작을 반복하게 되는데, 순시고장의 경우 이 동작 중에 자연 소멸된다. 그러나 영구고장의 경우 재폐로에 과정에서 고장이 제거되지 않음으로서 보호기기가 재 폐로에 실패, 완전 개방되어 정전구간을 확대시킨다. 이러한 경우 HR 3]에 근거 두번째 무전압 감지 상태에서 고장구간 개폐기들을 개방시켜 자율적으로 고장구간을 분리하면, 영구고장으로 발전하기 전에 고장이 제거되어 보호기들이 재 폐로에 성공, 정전구간이 최소화된다.

HR 3] 두 번째 무전압 카운트이고 무전압 지속시간이 순시 무전압 시간 이내인 경우 고장구간 분리를 위해 Sink 존 개폐기들이 개방되도록 한다.

4. 자율적 부하용통 전략

일단 고장 및 고장 구간이 결정되면 건전 정전구간에 대한 부하용통 전략이 수립되고 이 전략에 근거하여 부하절체가 이루어져야 한다. 이때 부하절체 전략은 개폐기 조작회수 최소화, 부하 균등화 그리고 선로손실 최소화 등의 운영목적 하에서 수립될 수 있는데, 본 연구에서는 부하분단 균등화를 운영목적으로 하는 자율적 부하절체 전략이 수립된다.

4.1 운영목적[4]

부하 균등화는 계통상의 주변압기나 배전 선로들의 이상적 부하와 실제부하의 차를 최소화하는 문제로서 식 (1)로 정의된다.

$$S_{bala} = T_{bala} + F_{bala} \sum_{i \in T} (TIL_i - TAL_i)^2 + \sum_{i \in F} (FIL_i - FAL_i)^2 \quad (1)$$

여기서, T_{bala} , F_{bala} : 주변압기, 배전선로의 부하 균등화 지표
 TIL_i , FIL_i : T_i , F_i 의 이상부하로서 $LF \times$ 공급허용용량
 TAC_i : T_i 의 공급허용용량, $\min(TNC_i, \sum_{i \in FD_i} FNC_i)$
 FD_i : T_i 로 부터 전력공급을 받는 배전선로들의 집합
 LF : $\sum_{i \in T} TAL_i / \sum_{i \in T} TAC_i$

이 목적함수는 부하용통시 정전구간을 가급적 주변압기나 배전선로에 고르게 분담시킴으로써, 특정 주변압기나 배전선로가 심각한 과부하나 중부하를 경험하는 것을 방지한다. 따라서, 주변압기나 배전선로들이 열화에 의한 절연파괴로 소손되는 것을 가급적 방지하며 특히, 선로탈락으로 발생하는 정전사고를 방지할 수 있다. 또한, 비교적 합리적인 범위내에서 선로손실도 저감시킬 수 있다. 이 목적은 설비 이용률 향상을 위해 배전선로의 정격용량이 채고되는 상황

에서 더욱 그 중요성이 인식되고 있다.

4.2 자율적 건전 정전구간 분리 전략

본 연구에서 제안하는 부하 균등화가 얻어질 수 있도록 하기 위해서는 기본적으로 모든 건전 정전구간이 구간별로 분리돼야 한다. 따라서 자율적 부하용통 과정에서 부하 균등화가 얻어지도록 먼저 HR 4]에 의해서 건전 정전구간을 부하구간별로 분리한다.

HR 4] 두 번째 무전압 카운트이고 무전압 지속시간이 순시 무전압 시간을 초과하는 경우 영구고장으로 판단, 모든 무전압 개폐기들을 분리한다.

4.3 자율적 부하용통 전략

본 연구에서 제안하는 부하용통 전략은 영구고장으로 HR 4]에 의해서 모든 건전 구간이 개별 존(구간)으로 분할된 후, 연계 점에 있는 각각의 연계 개폐기들이 독립적으로 부하용통 전략을 시도하는 것이다. 그림 3은 본 연구에서 제안하는 자율적 부하용통 전략을 설명하기 위해 도입된 배전 계통을 보인다.

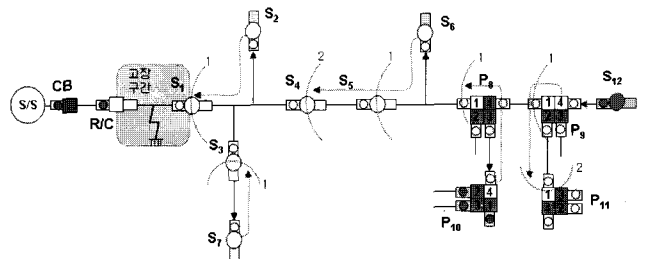


그림 3 부하분할 후 배전계통
 Fig. 3 Distribution system after the division of load zones

그림 3은 리클로우저와 개폐기 S1사이에서 영구고장이 발생한 경우를 보인다. 특히, 자율적 건전 정전구간 분리전략 HR 7]에 근거하여 고장구간 이후의 건전 정전구간들 상의 모든 개폐기들이 개방됨으로서 부하분할이 이루어졌다고 가정한다.

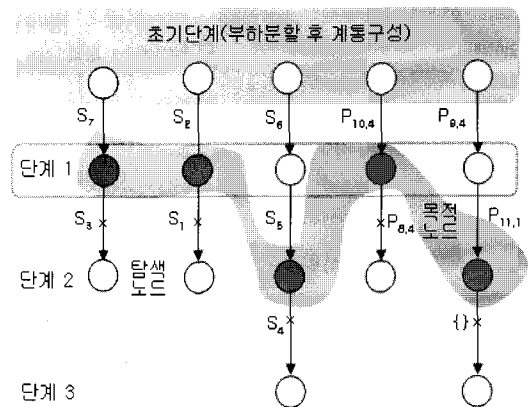


그림 4 자율적 부하용통 전략
 Fig. 4 Autonomous Load Transfer Strategy

그림 4는 그림 3의 고장의 경우를 중심으로 부하용통 전략을 설명하기 위해 도입된 부하용통 전략을 보인다. 그림에서 초기노드는 고장 후 부하분할이 이루어진 후의 계통 구성을 표시한다. 분기선은 1:1 통신을 기반으로 탐색되는 연계 개폐기를 의미하며, 일반 노드는 선택된 연계 개폐기 투입 후 계통 구성을 표시한다. 그림 4에서 호 번호는 분기선 레벨 번호를 표시한다.

초기단계] 부하분할이 완료된 후 정전 무 전압을 경험한 FRTU들은 HR 8]을 기반으로 연계 개폐기 여부를 확인한다. 다음, 각 FRTU들은 네이버 존 정보를 활용하여 무 전압 Source 존의 Source 개폐기를 확인한 후, 1:1 통신을 기반으로 Source FRTU에게 부하용통 요청 메시지를 전송한다.

HR 5] 개폐기가 고장구간 분리 개폐기가 아니고 양단의 전압 센서들 중 일방 센서가 정전 무전압을 경험하면 연계 개폐기로 판정한다.

부하용통 허가 요청 메시지를 수신한 Source FRTU는 수신 메시지를 중 HR 6]을 만족하는 메시지를 전송한 FRTU에 부하용통 허가 메시지를 전송한다.

HR 6] 부하분담 피더의 전압이 높은 개폐기가 선택된다.

이 규칙은 연계 개폐기들이 동시에 하나의 부하구간에 전원을 공급하게 됨으로서 루프운전이 되는 것을 방지하고 연계 점의 전압이 높은 개폐기가 부하를 분담하도록 함으로서 부하 균등화를 얻기 위한 규칙이다. 루프운전의 경우, 부하 분담 선로들이 보호기기의 오동작으로 정전을 경험할 수 있다. 최종적으로 Source 개폐기 FRTU로부터 부하용통 허가 메시지를 수신 한 연계 개폐기들이 부하용통이 가능한 연계 개폐기로 결정된다. 그리고 부하용통을 위해 투입된다.

연계 개폐기들 중 HR 5-6]을 만족하는 개폐기들은 {S₇, S₂, S₆, P_{10,4}, P_{9,4}}다. 이들은 부하용통을 시도하기 위해 각각 투입되어, 단계 1]의 새로운 계통구성을 결정하게 된다. 연계 개폐기들의 부하용통 과정을 설명하면 다음과 같다. 연계 개폐기 S₇이 투입됨으로서 정전구간 {S₇, S₃}이 S₇에 할당되며, S₃는 새로운 연계 개폐기가 된다. 연계 개폐기 S₂가 투입됨으로서 정전구간 {S₂, S₁, S₃, S₄}가 S₂에 할당된다. 이때 S₁은 새로운 연계 개폐기가 된다. 연계 개폐기 S₆이 투입됨으로서 정전구간 {S₆, S₅, P_{8,1}}이 S₆에 할당되며, S₅는 새로운 연계 개폐기가 된다. 연계 개폐기 P_{10,4}가 투입됨으로서 정전구간 {P_{10,4}, P_{8,1}}이 P_{10,4}에 할당된다. 이때 P_{8,1}은 새로운 연계 개폐기가 된다. 다음, 연계 개폐기 P_{9,4}가 투입됨으로서 정전구간 {P_{9,4}, P_{9,1}, P_{9,13}, P_{11,1}}가 P_{9,4}에 할당되고 동시에 P_{11,1}은 새로운 연계 개폐기가 된다.

단계 1] 새로운 계통구성 하에서 정전 무 전압을 경험하는 FRTU들이 HR 8]을 기반으로 연계 개폐기 여부를 확인한다. 다음, FRTU들은 초기단계]와 동일한 과정을 반복한다. 무 전압 Source 존의 Source 개폐기를 확인하여 1:1 통신을 기반으로 Source FRTU에 부하용통 요청 메시지를 전송한다. Source FRTU들은 수신 된 부하용통 메시지들 중

HR 6]을 만족하는 메시지를 전송한 FRTU에 부하용통 허가 메시지를 전송한다. 최종적으로 부하용통 허가 메시지를 수신 한 연계 개폐기들이 부하용통이 가능한 연계 개폐기로 결정되고, 부하용통을 위해 투입된다. 그림 4에서 새로운 연계 개폐기들 {S₃, S₁, S₅, P_{8,1}, P_{11,1}} 중 HR 5-6]을 만족하는 개폐기들 {S₅, P_{11,1}}가 부하용통을 시도하기 위해 각각 투입된다. 그리고 단계 2]의 새로운 계통구성이 결정된다. 이 과정을 설명하면 다음과 같다. 연계 개폐기 S₃이 이미 전압상태이기 때문에 HR 5]에 근거하여 S₇로부터 시작된 탐색이 중단된다. 연계 개폐기 S₁이 고장구간 분리 개폐기이기 때문에 HR 5]에 근거하여 S₂로부터의 탐색이 중단된다. 연계 개폐기 S₅가 투입됨으로서 정전구간 {S₅, S₄}가 S₅에 할당되고 S₄가 새로운 연계 개폐기가 된다. 연계 개폐기 P_{8,1}이 이미 전압상태이기 때문에 P_{10,4}로부터의 탐색이 중단된다. 다음, 연계 개폐기 P_{11,1}이 투입됨으로서 부하 {P_{11,2}, P_{11,3}, P_{11,4}}가 P_{11,1}에 할당되고 이때, 새로운 연계 개폐기는 존재하지 않기 때문에 부하용통 탐색 과정은 중단된다.

단계 2] 새로운 계통구성 하에서 정전 무 전압을 경험하는 FRTU들이 HR 5]을 기반으로 연계 개폐기 여부를 확인한다. 다음, FRTU들은 단계 1]과 동일한 과정을 반복한다. 그림 4에서 새로운 연계 개폐기 집합 {S₄} 중 HR 5-6]을 만족하는 개폐기들이 존재하지 않기 때문에 자율적 부하용통 작업은 종료된다.

5. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 자율적 부하용통 전략을 제안하였다. 이때 제안된 부하용통 전략은 가공 및 지중 배전계통으로 구성되는 배전계통에 대한 자율적 고장 및 고장구간 판단, 고장구간 분리, 건전 정전부하 분할 그리고 부하용통 전략으로 구성된다. 따라서 제안된 전략의 유효성을 보이기 위해 가공 및 지중 배전계통을 포함하는 배전계통 모델이 성능시험 시스템으로 활용된다.

5.1 시험 배전 시스템

시험 배전계통[4,8]은 그림 5와 같이 4대의 주변압기로부터 각각 전력을 공급받는 6, 6, 6, 8개의 실 선로들 중에서 상이한 부하패턴을 보이는 6개의 배전 선로들로 구성하였다.

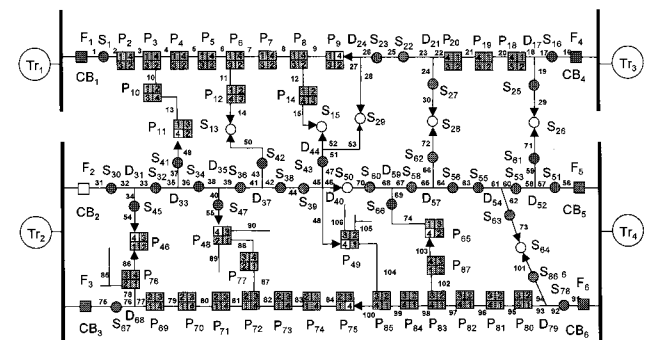


그림 5 성능평가를 위한 시험 배전 시스템
Fig. 5 Test distribution system for the evaluation of performance

시스템내의 주변압기들 {T₁, T₂, T₃, T₄}에 대한 용량과 특정시점에서의 실제부하는 표 1과 같다. 정격용량은 OA용량, 최대용량은 FA용량을 나타낸다. 표 2는 배전선로의 정격용량, 최대용량 및 부하를 표시한다.

표 1 주변압기 정격용량

Table 1 Main transformer capacities

KVA \ ID	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
정격용량 [KVA]	30,000	45,000	30,000	45,000
최대용량 [KVA]	40,000	60,000	40,000	60,000
실제부하 [KVA]	21,040	42,240	20,020	40,700

표 2 배전선로 데이터

Table 2 Feeder data

KVA \ ID	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
정격용량 [KVA]	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000
최대용량 [KVA]	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000
전류부하 [A]	280	220	220	150	180	250

첫 번째로 고장 및 고장구간 판단 전략 HR 1]에 근거하여 고장 구간이 {R/C, S₁}로 확인되고, 두 번째로 자율적 고장구간 분리전략 HR 3]에 근거하여 고장구간 개폐기 S₁이 개방된다. 그리고 리클로우저가 재 폐로에 실패하기 때문에 영구 개방됨으로서 고장구간 분리가 완료된다. 세 번째로 자율적 건전 정전구간 분리전략 HR 4]에 근거하여 고장구간 이후의 건전 정전구간들 상의 모든 개폐기들이 분리됨으로서 개별 부하분할이 이루어진다.

5.2 고장모의 및 성능평가

본 연구에서 제안한 자율적 부하용통 전략은 기존의 중앙 제어방식과는 달리 각 연계 개폐기 FRTU들이 스스로 그리고 병렬적으로 부하용통을 시도하는 전략이다. 따라서 DAS와의 원격 통신비용을 최소화해 고장복구 시간을 크게 줄이고 건전 정전부하가 연계 개폐기들을 중심으로 분할됨으로서 합리적인 범위 내에서 부하 균등화를 얻을 수 있음이 분명하다. 여기에서는 부하 균등화의 정도를 검증하기 위해서 그림 5의 시험 배전계통 중에서 배전선로 F₂, F₅에 대한 고장이 모의된다. 배전선로 F₂, F₅는 다른 배전선로들에 비해 3개 이상의 연계 점을 가지기 때문에 고장모의 시 부하 균등화 정도를 명확하게 확인할 수 있다.

5.2.1 배전선로 F₂ 고장 모의

말단선로에서 고장이 발생하는 경우 부하 균등화 정도를 비교할 수 있는 정보를 얻기가 어렵다. 따라서 그림 6과 같이 전원 단 부근의 선로구간 {S₃₀, S₃₂, S₄₅}에서 고장이 발생한 경우를 모의한다. 특히, 그림 6은 고장구간 및 이후의 모든 선로상의 개폐기들이 개방되어 고장구간 분리 및 부하분할이 얻어진 후의 계통구성을 보인다.

제안된 자율적 부하용통 전략에 의해서 얻어진 부하용통 솔루션과 대응하는 부하 균등화 지표는 표 3에 보인다. 연

계 개폐기가 7개 이므로 부하용통 영역은 7개 영역으로 구성되며, 단계 1-2는 각 영역별로 연계 개폐기가 투입된 상태에서 얻어지는 새로운 계통 구성을 표시한다. 그러나 경로 1, 4는 선택되지 못함으로서 대응하는 FRTU들은 부하용통 작업을 종료하게 된다. 제안된 부하용통 전략에 의해서 부하용통이 취해진 후 얻어진 6개의 부하용통 영역들을 그림 6에서 확인할 수 있다.

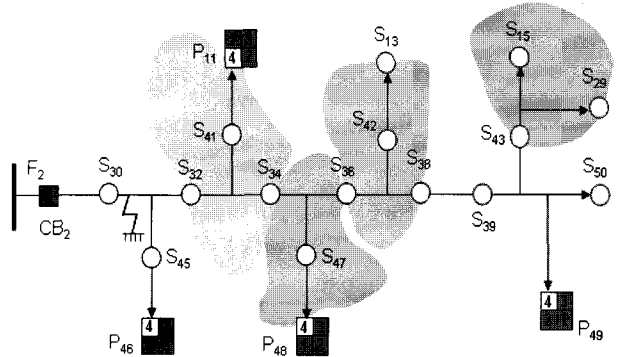


그림 6 선로 F₂ 사고에 대한 자율적 부하용통 솔루션
Fig. 6 Autonomous load transfer solution for F₂ fault case

표 3 부하용통 솔루션

Table 3 Load transfer solution

부하용통 전략	초기상태	단계 1	단계 2	부하 균등화 지표
영역1	S ₁₅			204.95[KVA]
영역2	S ₂₉	S ₂₉		
영역3	S ₅₀	S ₅₀	S ₃₉	
영역4	P _{49,4}			
영역5	S ₁₃	S ₁₃	S ₄₂	
영역6	S _{48,4}	S _{48,4}	S ₄₇	
영역7	P _{11,4}	P _{11,4}	S ₄₁	
영역8	P _{46,4}	P _{46,4}		

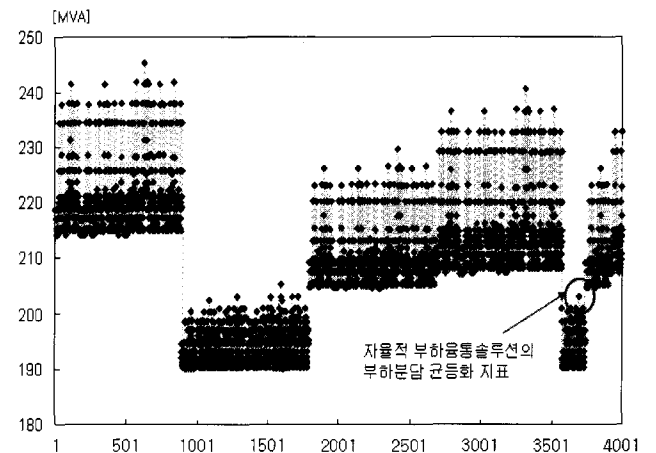


그림 7 선로 F₂ 사고 시 부하용통 솔루션들의 부하 균등화 지표

Fig. 7 Load balancing indices for the F₂ fault

그림 7은 총 11990개의 가능한 부하용량 조합 해들 중 4000개에 대한 부하 균등화 지표들을 보이는데, ◆는 각 해의 부하 균등화 지표를 보인다. 제안된 자율적 부하절제 전략에 의해서 얻어진 계통구성은 조합 해들 중 3797번째 조합 해에 해당하는데 이때 부하 균등화 지표는 그림 7에서 원안에 표시된 ◆로 표시된다. 그림에서 제안된 전략에 의해서 얻어진 3797번째 부하 균등화 정도가 최적은 아니지만 최소 탐색공간하에서 전체적으로 매우 만족할 만한 수준에 있음을 확인할 수 있다.

5.2.2 배전선로 F₅ 고장 모의

앞에서 설명하였듯이 말단선로에서 고장이 발생하는 경우 제안된 부하용량 해의 부하 균등화 지표가 어느 레벨에 속하는 지 그 우수성을 확인할 수 없다. 따라서 그림 8에 보인바와 같이, 선로구간 {S₅₁, S₅₃, S₆₁}에 고장이 발생한 경우를 모의하는데, 그림 8은 고장구간 및 이후의 모든 선로상의 개폐기들이 개방되어 고장구간 분리 및 부하분할이 얻어진 후의 계통구성을 보인다.

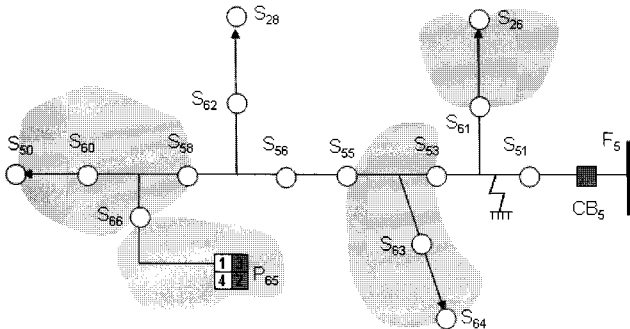


그림 8 선로 F₅ 사고에 대한 자율적 부하용량 솔루션
Fig. 8 Autonomous load transfer solution for F₅ fault case

제안된 자율적 부하용량 전략에 의해서 얻어진 해의 부하 균등화 솔루션과 대응하는 부하 균등화 지표는 표 4에 보인다. 연계 개폐기가 5개 이므로 부하용량 영역은 5개의 영역으로 구성되며, 각 단계 1-3은 개폐기가 투입된 상태에서 얻어지는 새로운 계통 구성을 의미한다.

표 4 부하용량 솔루션
Table 4 Load transfer solution

부하용량 전략	초기단계	단계 1	단계 2	단계 3	부하 균등화 지표
영역1	P _{65,4}	P _{65,4}	P _{65,1}		213.68[MVA]
영역2	S ₅₀	S ₅₀	S ₆₀		
영역3	S ₂₈	S ₂₈	S ₆₂		
영역4	S ₆₀	S ₆₀	S ₆₃	S ₅₆	
영역5	S ₂₆	S ₂₆			

그림 9는 총 3132개의 실행 가능한 부하용량 조합 해들 중 약 3000개의 부하 균등화 지표들을 보이는데 그림에서 ◆는 각 부하용량 해에 대한 부하 균등화 지표를 표시한다. 그림 9에서 제안된 자율적 부하절제 전략에 의해서 얻어진

계통구성에 대한 부하 균등화 지표는 원안에 표시된 175번째 ◆로 표시된다.

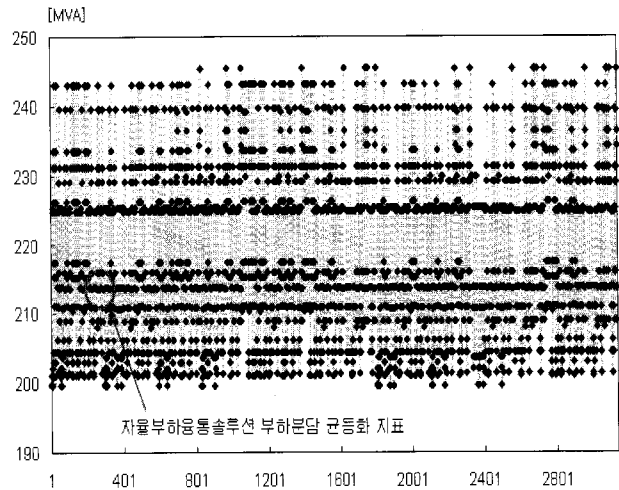


그림 9 선로 F₅ 사고 시 부하용량 솔루션들의 부하 균등화 지표

Fig. 9 Load balancing indices for the F₅ fault

따라서 제안된 전략에 의해서 얻어진 해의 부하 균등화 정도가 최적은 아니지만 최소의 탐색공간이 요구된다는 측면에서 비교적 만족할 만한 수준에 있음을 확인할 수 있다. 고장모의를 통해서 제안된 자율적 부하용량 전략이 DAS의 계산비용을 줄이고 시스템 운영자의 실수를 방지함으로써 높은 신뢰도하에서 부하용량 시간을 최소화할 수 있음은 물론, 매우 만족할 만한 수준의 부하 균등화를 취할 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 중앙제어방식의 고장구간 분리 및 복구 시 문제점을 해소하기 위해 새로운 시도로서 이더넷 통신기반의 자율적 고장판단 및 분리 그리고 고장복구 알고리즘을 제안하였다. 각 FRTU들은 네이버 존 FRTU들과 자율적으로 PtP 통신을 시도하여 전압, 전류 등 부하정보를 교환, 고장구간을 판단하고, 보호기기가 재 폐로에 성공하도록 적절한 시점에서 자율적으로 분리되도록 하였으며, 모든 정전 무 전압 경험 개폐기들이 개방되어 분하분할이 이루어지도록 하였다. 그리고 각 연계 개폐기 FRTU들이 동시에 자율적으로 자기의 부하용량 영역들을 결정하도록 함으로서 전전시간을 최소화함은 물론, 합리적인 범위 내에서 부하 균등화가 얻어지도록 설계하였다. 제안된 자율적 부하용량 전략은 가공 및 지중선로로 구성되는 시험 배전 시스템에 대한 수개의 고장 모의에서 자율적으로 신속하고 정확하게 고장구간을 분리할 수 있음은 물론, DAS의 계산비용을 줄이고 시스템 운영자의 간섭을 피함으로써 조작 실수를 방지하고 동시에 만족할 만한 수준의 부하 균등화를 취할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-313-D 00357)

참 고 문 헌

- [1] C. H. Castro, J. B. Bunch and T. M. Topka, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, pp. 549-557, March/April 1980.
- [2] T. Taylor and D. Lubkeman, "Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp 239-246, January 1990.
- [3] K. H. Jung, H. Kim and Y. S. Ko, "Network Reconfiguration Algorithm for Automated Distribution Systems based on Artificial Intelligence Approach," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 8, No. 4, pp. 1933-1941, Oct. 1993.
- [4] 고윤석, "배전계통의 다양한 이벤트들을 고려한 선로자동화 소프트웨어 개발" 전기학회논문지, Vol. 52A, No. 8, pp. 463-470, 2003년 8월.
- [5] IEC61850 Standards.
- [6] Juancarlo Depablos, "Internet Peer-to-Peer Communication Based Distribution Loop Control System", Master of Science in Electrical Engineering, 2003.
- [7] A. Apostolov, J. Beatty, et. al, "Application Of Peer-to-Peer Communications for Protective Relaying", IEEE PSRC Working Group H5 Report to the Communications Subcommittee, 2000.
- [8] Yun-Seok Ko, "A Self-Isolation Method for the HIF Zone under the Network-based Distribution System", IEEE Trans Power Delivery, Vol. 24, No. 2, pp. 884-891, 2009. 4.

저 자 소 개



고 윤 석 (高 鈞 錫)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 3월~1996년 3월 한국전기연구소 선임연구원. 1996년 4월~1997년 2월 포스코 경영연구소 연구위원. 1997년 3월~현재 남서울대학교 전자공학과 교수.



이 서 한 (李 書 漢)

1986년 7월02일 생
2006년 3월~현재 남서울대학교 전자공학과 학사과정



최 현 철 (崔 顯 撤)

1984년 10월22일 생
2003년 3월~현재 남서울대학교 전자공학과 학사과정



신 재 현 (辛 在 鉉)

1986년 7월02일 생
2006년 3월~현재 남서울대학교 전자공학과 학사과정