

## The Self-Fault Restoration Methodology based on the Recloser in the Distribution Systems

고 윤 석\*  
(Yun-Seok Ko)

**Abstract** - This paper proposes a new fault restoration method which adopts the recloser as top agent to release the problems of the data concentration and fault processing delay of the existing DAS(distribution Automation System) under the ubiquitous distribution system. In proposed method, top agent collects the data based on the multi-casting communication with the tie switches of the interconnection point, and then selects a closed switch(tie switch) to transfer the sound outage load to other feeders based on the heuristic search strategy step by step until the load transfer work is finished. Here, a new heuristic rule is developed which can guarantee the relational load balancing and line loss from the collected voltage data. Finally, the several faults are simulated for typical multi-section and multi-interconnection distribution system to prove the effectiveness of the proposed strategy, in particular, for each simulation cases, the load balancing index and line loss index of the obtained solution from the proposed method is compared with those of all of feasible solutions.

**Key Words** : Self-Fault Restoration, Ubiquitous-based System, Recloser Ethernet Communication, Distribution System

### 1. 서 론

최근, 유비쿼터스 시스템 네트워크는 기존 전통 산업에서 핵심적 역할을 해온 대규모 운전제어 시스템을 중앙제어기반 시스템에서 분산, 자율 그리고 협조제어를 기반으로 하는 에이전트 기반 시스템으로 변화시키고 있으며, 배전계통에 대해서도 예외 없이 새로운 변화가 요구되고 있다.

배전계통은 변전소 변압기로부터 인출되는 수십 개의 배전선로들로 구성되는데, 각 선로들은 선로 상에 구분 개폐기들, 선로 간의 연계 점에 연계 개폐기들이 설치되는 다분할 다연계 구조를 가지고 있다. 또한 선로 상에는 160만대의 배전 변압기가 설치되어 있으며 수용가들은 이들 변압기들로부터 전력을 공급받고 있다. 그리고 배전 자동화 시스템(DAS : Distribution Automation System)이 도입되어, 고장 또는 작업정전 시에 선로상의 보호기나 개폐기들을 원격에서 제어, 정전시간과 정전구간을 최소화함으로써 전력공급 신뢰도를 크게 개선할 수 있었는데[1-2], 배전 변압기 및 수용가 설비들은 데이터 감시 및 수집이 불가능한 분리된 영역으로 남아있어 효율적인 전력품질 관리 제어가 불가능하였다[3-5]. 최근, 유비쿼터스 시스템이 구축되면서 보호기기, 개폐기, 배전 변압기 그리고 수용가 설비 등 배전설비들이 고속 신호처리 및 데이터 처리가 가능한 고성능 마이크로 프로세서를 주제어장치로 채택하고, 초고속 대용량 정보 전송이 가능한 광 네트워크에 접속됨으로써 설비들 상호간에

자유로운 고속 데이터 교환이 가능해지고 있다. 그러나 다양한 설비들로부터의 데이터 전송량이 폭주함으로써 중앙 관리 및 제어가 현실적으로 매우 어렵게 되고 있으며, 부하의 가변성과 예측의 어려움 때문에 DAS의 최적 부하절제에 대한 신뢰성이 저하됨으로서 데이터를 분산할 수 있는 에이전트 기반의 분산 자율 관리 및 고장 복구 시스템이 요구되고 있다[6-8].

따라서 본 연구에서는 유비쿼터스 배전계통 하에서 기존 배전자동화시스템의 중앙 집중 제어방식으로 인한 데이터 집중 및 고장처리 지연의 문제점을 개선하기 위해 리클로우저를 에이전트로 하는 새로운 에이전트 기반의 자율적 고장 복구 전략을 제안한다. 제안된 복구전략에서는 탑 에이전트가 연계 점의 연계 개폐기들로부터 멀티 캐스팅 통신 방식(1:n)에 기반하여 데이터를 수집한 후, 부하용량이 완료될 때까지 매 단계별로 휴리스틱 기반 탐색전략에 근거하여 부하용량 개폐기를 선택하게 된다. 여기서 수집된 전압 데이터를 가지고 합리적인 레벨로 부하분담 균등화와 선로손실 최소화를 얻을 수 있는 새로운 휴리스틱이 개발된다. 끝으로, 대표적인 다분할 다연계 배전 시스템에 대해서 수개의 고장이 모의되며, 각각의 고장 모의 경우에 대해서 제안된 전략에 의해서 얻어진 해의 부하분담 균등화 및 선로손실 지표를 가능한 모든 해의 지표들과 비교함으로써 제안된 전략의 유효성을 확인한다.

### 2. 배전계통 구성 및 모델링

#### 2.1 배전계통 구성

배전계통은 고밀도 부하지역 등 다양한 부하지역을 경우

\* 정 회 원 : 남서울대학 전자공학과 교수 · 공박

E-mail : ysko@nsu.ac.kr

접수일자 : 2009년 5월 25일

최종완료 : 2009년 7월 6일

하기 때문에 가공선로와 지중선로가 혼재하는 복합된 구성을 보인다. 그림 1은 가공선로와 지중선로가 혼재하는 대표적인 배전계통을 보인다.

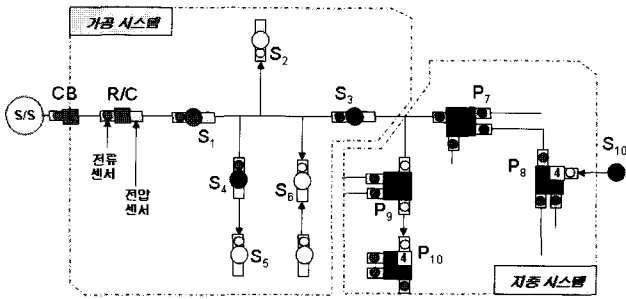


그림 1 배전계통 구성  
Fig. 1 Distribution system configuration

그림 1에서 CB(Circuit Breaker)는 회로 차단기 R/C는 리클로우저,  $S_i$ 는 가공선로 상의  $i$ 번째 가공 개폐기를 의미하며,  $P_j$ 는 지중선로 상의  $j$ 번째 다회로 개폐기를 의미한다. 특히,  $P_{i,j}$ 는  $i$ 번째 다회로 개폐기의  $j$ 번째 회로를 의미하며, □안의 숫자로 표시된다. 심볼 ■, □는 회로 차단기나 리클로우저, 다회로 개폐기의 투입, 개방상태, 심볼 ●, ○는 개폐기의 투입 개방된 상태를 표시한다. 개폐기들  $S_2, S_5, P_{8,4}, P_{10,4}$ 는 타 선로로부터의 부하용동을 위한 연계 개폐기들이다. 개폐기 양방의 □는 3상 전압센서, 일방의 ○는 3상 전류센서를 표시한다. 그리고 보호기구나 개폐기들로 둘러싸이는 지역은 선로구간 또는 부하구간(Zone)으로 칭한다.

2.2 유비쿼터스 기반 배전계통 구성

유비쿼터스 기반 배전계통에서 배전자동화시스템(DAS), 그리고 리클로우저나 자동화 개폐기(A/S)들은 선로원격단말기(FRTU:Feeder Remote Terminal Unit)를 통해서 이중 링 방식의 광케이블에 접속된다.

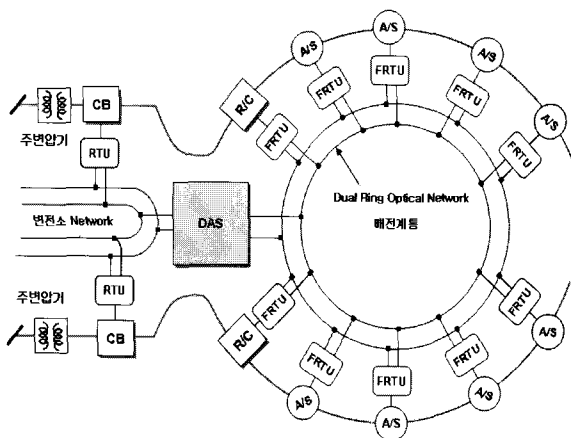


그림 2 이더넷 기반 배전 계통 구성  
Fig. 2 Ethernet-based distribution system configuration

그림 2는 2개의 배전선로들에 대한 대표적인 유비쿼터스 기반 계통구성을 보이는데, DAS는 물론, 2개의 배전선로 상의 CB, 리클로우저, 개폐기 등 전력설비들이 FRTU를 통해서 이중 링 방식의 광케이블에 접속되도록 구성된다. 따라서 FRTU를 통해서 DAS와 개폐기간, 개폐기와 개폐기간의 자유로운 고속 데이터 교환이 가능하다.

2.3 배전계통 네이버 존(NeighborZone)모델링[8]

개폐기간의 데이터 교환을 기반으로 고장판단 및 고장복구를 위해서는 각 개폐기의 FRTU가 전기적 연결성에 기반한 개폐기 연결성 맵을 가지고 있어야 한다. 각 개폐기가 모든 개폐기들의 연결성을 보유하는 것이 이상적이지만 현실적으로 불가능하기 때문에, 실제로 실현 가능한 방법론이 요구된다. 따라서 실현가능한 방법론으로 최소화된 개폐기 연결성 맵인 네이버 존이 정의된다. 그림 3은 배전계통 네이버 존의 정의를 보이는데, 하나의 개폐기에 인접한 2개의 선로 존들을 그 개폐기에 대한 네이버 존으로 정의한다. 하나의 개폐기에 전원을 공급하는 네이버 존을 전원(Source) 네이버 존, 반면에 그 개폐기로부터 전원을 공급받는 네이버 존을 부하(Sink) 네이버 존으로 정의한다. 각 개폐기 FRTU들은 이들 전원(Source)과 부하(Sink) 네이버 존의 개폐기 연결성 맵만을 가지도록 설계되기 때문에 실제로 실현가능하며, 전원과 부하 네이버 존들의 개폐기들과 자유로운 정보교환이 가능해진다.

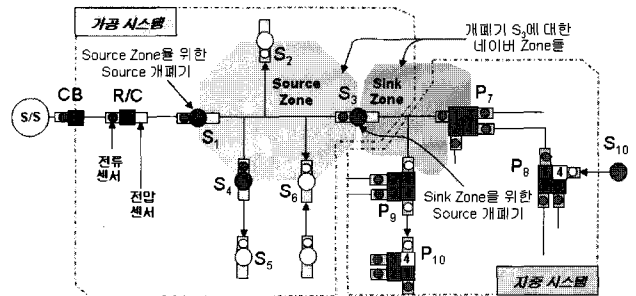


그림 3 배전계통 네이버 존 모델링  
Fig. 3 Distribution system neighbor zone modelling

그림 3에서 개폐기  $S_3$ 에 대한 네이버 존은 개폐기  $S_3$ 에 인접한 두 개의 네이버 존 { $S_1, S_2, S_3, S_4, S_6$ }와 { $S_3, P_7, P_9$ }로 정의되며, 개폐기  $S_3$ 에 전원을 공급하는 네이버 존 { $S_1, S_2, S_3, S_4, S_6$ }가 전원 네이버 존, 개폐기  $S_3$ 로부터 전원을 공급받는 네이버 존 { $S_3, P_7, P_9$ }가 부하 네이버 존으로 정의된다. 특히, 개폐기  $S_1$ 은 전원 네이버 존에 전원을 공급하는 개폐기이기 때문에 전원 네이버 존에 대한 전원 개폐기 속성을 가지며, 반면에 개폐기  $S_3$ 은 부하 네이버 존에 대한 전원 개폐기 속성을 가지기 때문에 부하 네이버 존에 대한 전원 개폐기 속성을 가지는 것으로 정의된다.

3. 자율적 고장 복구 전략

3.1 자율고장판단및분리,부하분할전략

기존 개폐기 FRTU는 상·지락 픽업전류보다 큰 전류가

호르는 경우 고장으로 판단한다. 이 경우 돌입전류도 고장으로 결정할 수 있으며 고장구간 확인도 어렵다. 따라서 여기에서는 고장전류를 경험한 FRTU가 부하 네이버 존의 FRTU들과 통신을 통해 전압정보를 확인, 휴리스틱 규칙 (HR : Heuristic Rule)에 근거하여 고장 및 고장구간을 판단할 수 있도록 한다. 고장구간이 판단되면 고장구간(Sink Zone)의 개폐기 FRTU들은 정해진 무 전압 카운트에 개폐기를 개방하여 고장구간을 분리하고 다운 스트림 개폐기들의 FRTU들은 정전 무전압을 경험할 때 개폐기를 개방하여 부하를 구간별로 분할한다.

HR 1] 부하 네이버 존의 개폐기들 중 고장전류를 경험하는 상을 가지는 개폐기가 존재하지 않거나 무 전압을 경험하는 상을 가지는 개폐기가 존재하는 경우 고장으로 판단하고 그 부하 네이버 존을 고장구간으로 한다.

이 규칙은 고장 시 고장 구간의 업 스트림 구간들은 고장 전류를 경험하고 무 전압은 경험하지 않는 반면, 다운 스트림 구간들은 고장전류를 경험하지 않고 무 전압을 경험한다는 고장특성으로부터 얻어진다.

3.2 자율 고장복구 전략

제안되는 부하용통 전략은 그림 4로 설명될 수 있다. 그림 4에서 초기노드는 고장이 발생하고 고장구간 분리 및 부하분할이 이루어진 후의 계통구성을 보인다. 일반노드 ○는 휴리스틱 비용 평가 후 선택된 개폐기가 투입되는 경우의 계통구성을 의미하며, 노드 ●는 실제로 선택된 연계 개폐기가 투입된 후의 계통구성을 표시한다. 브랜치는 휴리스틱 평가 비용(@)을 표시한다.

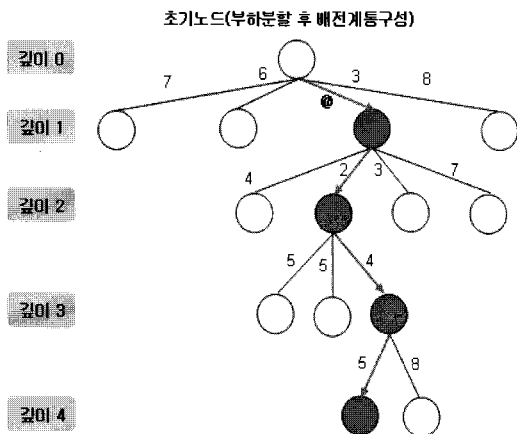


그림 4 자율적 부하용통 전략  
Fig. 4 Autonomous service restoration strategy

깊이 0] 고장이 발생한 후, 부하분할이 이루어진 계통구성 하에서 고장전류를 경험한 리클로우저가 리클로우저 IP(IP<sub>R</sub>)정보를 포함하는 데이터 요청 메시지를 멀티 캐스팅 방식으로 전송한다. 이때 데이터 요청 메시지를 수신한 연계 점의 연계 개폐기들 중 4개의 정전 무 전압을 경험한 연계 개폐기들은 휴리스틱 비용 @ 즉, 양방의 전압 정보 중

전전선로의 말단전압을 계측하고 개폐기 IP(IP<sub>Tij</sub>) 및 측정된 전압 정보를 포함하는 데이터 메시지를 각각 작성, 리클로우저(IP<sub>R</sub>)로 전송한다. 여기서 IP<sub>Tij</sub>는 i번째 깊이의 j번째 연계 개폐기를 의미한다. 리클로우저는 휴리스틱 규칙 HR 2]에 근거하여 최소비용의 개폐기를 선택한다. 그림 4에서는 네 개의 연계 개폐기 중 비용 3의 개폐기(IP<sub>T0,3</sub>) 즉, 브랜치가 최소비용의 개폐기로 선택된다.

HR 2] 전전선로의 말단전압 중 최고전압의 개폐기를 선택한다. 이 규칙은 변전소모선에서 선로말단까지의 전압강하가 가장 작은 선로를 부하용통 선로로 선택하기 위한 규칙이다.

일반적으로 DAS는 식 부하분담 균등화 식 (1)과 선로손실 식(2)를 최소화하는 것을 운영목표로 한다. DAS는 주변압기와 선로의 허용용량 및 부하정보, 선로구간 정보 등이 DB에 기록되어 있기 때문에 구간부하 절체 후의 부하분담 균등화 지표 및 선로손실 지표를 쉽게 계산, 확인 할 수 있다.

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

여기서, T<sub>bala</sub>, F<sub>bala</sub> : 주변압기, 배전선로의 부하 균등화 지표  
 TIL<sub>i</sub>, FIL<sub>i</sub> : T<sub>i</sub>, F<sub>i</sub>의 이상부하로서 LF×공급허용용량  
 TAC<sub>i</sub> : T<sub>i</sub>의 공급허용용량, min(TNC<sub>i</sub>, ∑<sub>i ∈ FD<sub>i</sub></sub> FNC<sub>i</sub>)  
 FD<sub>i</sub> : T<sub>i</sub>로 부터 전력공급을 받는 배전선로들의 집합  
 LF : ∑<sub>i ∈ T</sub> TAL<sub>i</sub> / ∑<sub>i ∈ T</sub> TAC<sub>i</sub>  
 TNC<sub>i</sub>, FNC<sub>i</sub> : 주변압기, 배전선로의 정격용량

$$P_L = \sum_{i \in F} \sum_{j=1}^{L_i} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_{ij}^2} * r_{ij} \tag{2}$$

여기서, L<sub>ij</sub> : i번째 배전선로의 j번째 선로구간  
 P<sub>ij</sub>, Q<sub>ij</sub>, r<sub>ij</sub>, x<sub>ij</sub>, V<sub>ij</sub> : L<sub>ij</sub>의 유효, 무효전력, 저항, 리액턴스, 모션전압

하지만, 리클로우저나 개폐기의 FRTU는 이들 데이터가 존재하지 않으며, 최소화된 개폐기 맵(네이버 존)만을 가지기 때문에 부하절체 후의 목적지표들을 추정할 수 없다. 이때 이 규칙을 적용하면 구간부하 절체후의 목적지표를 직접적으로 추정할 수 없어 최적 해를 얻기 어렵지만, 목적지표들을 감소시키기 때문에 합리적인 범위 내에서 부하용통을 위한 부하절체 개폐기를 선택할 수 있다. 특히, 가변부하 상태에서 최적해의 의미는 크지 않다. 다음, 리클로우저는 선택된 개폐기에 개폐기 투입 메시지를 전송하고, 메시지를 수신한 개폐기 FRTU는 개폐기를 투입, 부하를 용통한 후, 전원 네이버 존의 전원 개폐기에 연계 개폐기 상태임을 알린다. 그리고 이를 수신한 전원 개폐기는 연계 개폐기 규칙 (TR : Tie switch Rule)에 근거하여 연계 개폐기 여부를 결정한다. 그림 4에서는 깊이 1이 4개의 노드를 가지기 때문에 전원 개폐기가 4개의 연계 개폐기임을 나타낸다.

TR] 고장구간 개폐기인 경우 탐색을 중단한다. 이 규칙은 고장구간은 부하용통이 될 수 없고 분리된 상태로 남아 있어야 하기 때문에 부하용통 프로세스를 중단하기 위한 규칙이다.

깊이 1] 리클로우저는 깊이 0에서와 같은 방법으로, 리클로우저 IP(IP<sub>R</sub>)정보를 포함하는 데이터 요청 메시지를 멀티캐스팅 방식으로 전송한다. 이때 데이터 요청 메시지를 수신한 4개의 연계 개폐기들이 양방의 전압 정보 중 건전선로의 말단전압을 계측하고 IP<sub>Tij</sub> 및 측정된 전압 정보를 포함하는 데이터 메시지를 각각 작성, 리클로우저로 전송한다. 리클로우저는 수신된 데이터 메시지를 분석, HR]에 근거하여 비용 2의 브랜치에 해당하는 연계 개폐기(IP<sub>T1,2</sub>)를 최소비용의 개폐기로 결정하고 개폐기 투입 메시지를 전송한다. 메시지를 수신한 연계 개폐기 FRTU는 투입, 부하를 용통한 후, 전원 네이버 존의 전원 개폐기에게 연계 개폐기 메시지를 전송하고 이를 수신한 개폐기는 스스로 TR]에 근거하여 연계 개폐기 여부를 결정하는데, TR]을 만족하는 것으로 가정되어 그림 4에서 네 개로 표시된다.

깊이 2] 리클로우저는 깊이 0, 1]에서와 같은 방법으로, 연계 개폐기들로부터 데이터 메시지를 수신한 후 수신된 데이터 메시지를 분석, HR]에 근거하여 비용 4의 브랜치에 해당하는 연계 개폐기(IP<sub>T2,3</sub>)을 최소비용의 개폐기로 결정하고 개폐기 투입 메시지를 전송한다. 메시지를 수신한 연계 개폐기 FRTU는 투입, 부하를 용통한 후, 전원 네이버 존의 전원 개폐기에게 연계 개폐기 메시지를 전송하고 이를 수신한 개폐기는 스스로 TR]에 근거하여 연계 개폐기 여부를 결정하는데, 그림 4에서는 연계 개폐기 조건을 위반하는 것으로 가정되어 깊이 2에서 노드는 3개로 표시된다.

깊이 3] 리클로우저는 깊이 0, 1, 2]에서와 같은 방법으로, 연계 개폐기들로부터 데이터 메시지를 수신한 후 수신된 데이터 메시지를 분석, HR]에 근거하여 비용 5의 브랜치에 해당하는 연계 개폐기(IP<sub>T3,1</sub>)을 최소비용의 개폐기로 결정하고 개폐기 투입 메시지를 전송한다. 메시지를 수신한 연계 개폐기 FRTU는 투입, 부하를 용통한 후, 전원 네이버 존의 전원 개폐기에게 연계 개폐기 메시지를 전송하고 이를 수신한 개폐기는 스스로 TR]에 근거하여 연계 개폐기 여부를 결정하는데, 그림 4에서는 연계 개폐기 조건을 위반하고 더구나 그 연계 개폐기를 투입함으로써 더 이상 다른 무 전압 연계 개폐기들이 존재하지 하는 경우로 가정 되므로 부하용통 프로세스는 중단된다.

그림 5는 제안된 부하절체 전략을 설명하기 위해 도입된 계통을 보인다. 그림에서 선로구간 {R/C, S<sub>1</sub>}사이에서 고장이 발생하고 고장구간 분리 및 부하분할이 완료된 경우를 가정하자. 그림에서 아크 번호는 부하용통 단계를 표시한다.

단계 1] 리클로우저(R/C)는 데이터 요청 메시지를 멀티캐스팅 방식으로 전송한다. 이때 데이터 요청 메시지를 수신한 연계 개폐기들 {S<sub>2</sub>, S<sub>5</sub>, S<sub>6</sub>, P<sub>8,4</sub>, P<sub>10,4</sub>}는 전압정보를 포함하는 데이터 메시지를 각각 작성, 리클로우저(IP<sub>R</sub>)로 전송한다. 리클로우저는 HR]에 근거하여 최소비용의 개폐기를 선택하는데, P<sub>8,4</sub>가 가장 높은 전압 값에 해당한다고 가정

하면, 연계 개폐기 S<sub>5</sub>가 선택되고, 개폐기 투입 명령 메시지를 전송한다. 메시지를 수신한 S<sub>5</sub>는 개폐기를 투입, 선로구간 {S<sub>5</sub>, S<sub>4</sub>}을 용통한 후, 전원 네이버 존의 전원 개폐기 S<sub>4</sub>에게 연계 개폐기 여부 결정 메시지를 전송하고 S<sub>4</sub>는 TR]을 기반으로 스스로 연계 개폐기임을 결정한다.

단계 2] 리클로우저(R/C)는 단계 1]과 같은 방법으로 연계 개폐기들 {S<sub>2</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>6</sub>, P<sub>8,4</sub>, P<sub>10,4</sub>}로부터 전압정보를 포함하는 데이터 메시지를 순시 한 후, HR]에 근거하여 P<sub>8,4</sub>를 최소비용의 연계 개폐기라고 결정한 후, 연계 개폐기 P<sub>8,4</sub>에 개폐기 투입 명령 메시지를 전송한다. P<sub>8,4</sub>는 개폐기를 투입, 부하구간 {P<sub>8,1</sub>, P<sub>8,4</sub>}를 용통한 후, 전원 개폐기 P<sub>8,1</sub>에게 연계 개폐기 여부 결정 메시지를 전송하고 P<sub>8,1</sub>은 TR]을 기반으로 스스로 연계 개폐기임을 결정한다.

단계 3] 리클로우저(R/C)는 단계 1, 2]와 같은 방법으로 연계 개폐기들 {S<sub>2</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>6</sub>, P<sub>8,1</sub>, P<sub>10,4</sub>}로부터 전압정보를 포함하는 데이터 메시지를 순시 한 후, HR]에 근거하여 연계 개폐기 P<sub>8,1</sub>에 개폐기 투입 명령 메시지를 전송한다. P<sub>8,1</sub>은 개폐기를 투입, 선로구간 {P<sub>7,1</sub>, P<sub>8,1</sub>}을 용통한 후, 전원 개폐기 P<sub>7,1</sub>에게 연계 개폐기 여부 결정 메시지를 전송하고 P<sub>7,1</sub>은 TR]을 기반으로 스스로 연계 개폐기임을 결정한다.

단계 4] 리클로우저(R/C)는 단계 1, 2, 3]과 같은 방법으로 연계 개폐기들 {S<sub>2</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>6</sub>, P<sub>7,1</sub>, P<sub>10,4</sub>}로부터 전압정보를 포함하는 데이터 메시지를 순시 한 후, HR]에 근거하여 연계 개폐기 S<sub>2</sub>에 개폐기 투입 명령 메시지를 전송한다. S<sub>2</sub>는 개폐기를 투입, 선로구간 {S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>6</sub>}을 용통한다. 전원 개폐기 S<sub>1</sub>은 TR]을 위반하므로, 더구나 연계 개폐기들 {S<sub>4</sub>, S<sub>6</sub>}은 조건을 만족하지 않으므로 연계 개폐기 자격조건을 잃게 된다.

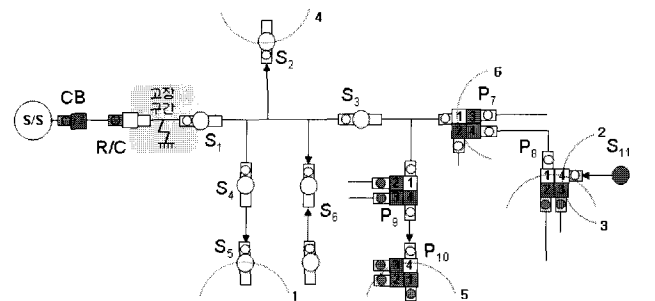


그림 5 부하용통 예  
Fig. 5 The fault restoration example

단계 5] 리클로우저(R/C)는 단계 1, 2, 3, 4]와 같은 방법으로 연계 개폐기들 {P<sub>7,1</sub>, P<sub>10,4</sub>}로부터 전압정보를 포함하는 데이터 메시지를 순시 한 후, HR]에 근거하여 연계 개폐기 P<sub>10,4</sub>에 개폐기 투입 명령 메시지를 전송한다. P<sub>10,4</sub>는 개폐기를 투입, 선로구간 {P<sub>9,1</sub>, P<sub>10,4</sub>}을 용통한 후, 전원 개폐기 P<sub>9,1</sub>에 연계 개폐기 여부 결정 메시지를 전송한다. P<sub>9,1</sub>은 TR]을 만족하므로 새로운 연계 개폐기가 된다.

단계 6] 리클로우저(R/C)는 단계 1, 2, 3, 4, 5]와 같은 방법으로 연계 개폐기들 {P<sub>7,1</sub>, P<sub>9,1</sub>}로부터 전압정보를 포함하는 데이터 메시지를 순시 한 후, HR]에 근거하여 연계 개폐기 P<sub>7,1</sub>에 개폐기 투입 명령 메시지를 전송한다. P<sub>7,1</sub>은 개폐기를 투입, 선로구간 {S<sub>3</sub>, P<sub>7,1</sub>, P<sub>9,1</sub>}을 용통한다. 전원 개

폐기 S<sub>3</sub>과 P<sub>9,1</sub>은 모두 TR]과 조건을 만족하지 않으므로 연계 개폐기 자격조건을 잃게 된다.

단계 7] 리클로우저(R/C)는 더 이상 연계 개폐기가 존재하지 않으므로 부하용통 프로세스를 끝내고 초기상태로 리턴한다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 기존 방식의 데이터 집중 및 고장처리 지연의 문제점을 개선하기 위해 가공 및 지중 선로들로 구성되는 배전계통에 대해 리클로우저를 중심 에이전트로 하는 에이전트 기반 고장판단, 분리 및 복구전략을 제안하였다. 제안된 고장 및 고장구간 판단 전략은 고장특성 상 부하 내이버 존의 개폐기들로부터 전류 및 전압 정보를 수집하게 되면 정확하게 판단 할 수 있다. 따라서 여기에서는 고장복구 전략의 유효성이 검증되는데, 가공 및 지중 선로들로 구성되는 대표적인 배전계통에 대해 수개의 고장을 모의하고 제안된 전략에 근거하여 고장복구 솔루션을 구한 다음, 그 고장복구 전략의 부하분담 균등화 및 선로손실 지표가 합리적인 범위 내에 있는지를 확인한다.

##### 4.1 시험 배전 시스템

시험 배전계통[2, 8]은 그림 6과 같이 4대의 주변압기로부터 각각 전력을 공급받는 6, 6, 6, 8개의 실 선로들 중에서 상이한 부하패턴을 보이는 6개의 배전선로들로 구성하였다.

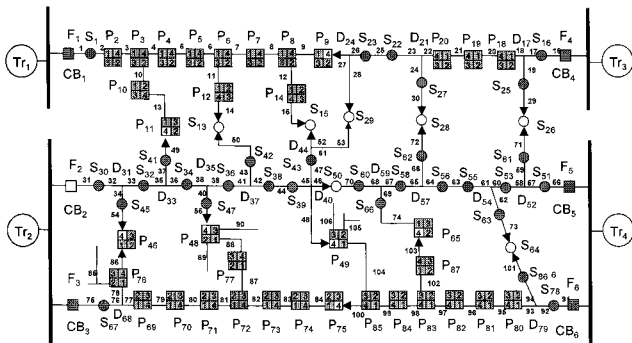


그림 6 성능평가를 위한 시험 배전 시스템  
Fig. 6 Test distribution system for the evaluation of performance

시스템내의 주변압기들 (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>)에 대한 용량과 특정지점에서 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 <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 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 <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> | F <sub>3</sub> | F <sub>4</sub> | F <sub>5</sub> | F <sub>6</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 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            |

##### 4.2 고장모의 및 성능평가

그림 6의 시험 배전계통은 6개의 선로들로 구성되는데 배전선로들 (F<sub>1</sub>, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>6</sub>)은 F<sub>2</sub>, F<sub>5</sub>에 비해 연계 선로수가 2개 이므로 선로손실 측면에서는 지표의 유효성 레벨을 확인할 수 있으나 부하분담 균등화 지표의 우수성을 확인하기에는 어려움이 있다. 따라서 여기에서는 연계 선로수가 3개 이상으로 충분한 부하분담 균등화 및 선로손실 지표의 우수성을 비교, 확인할 수 있도록 배전선로 F<sub>2</sub>, F<sub>5</sub>에 대한 고장이 모의된다.

##### 5.2.1 배전선로 F<sub>2</sub> 고장 모의

전원 단 부근의 선로구간 {S<sub>30</sub>, S<sub>32</sub>, S<sub>45</sub>}에서 일선 지락고장이 발생한 경우를 모의한다. 일반적으로 선로말단 부근에서 고장이 발생하는 경우 해의 조합 수가 극히 작기 때문에 제안된 전략의 부하분담 균등화 및 선로손실 지표 레벨이 어느 정도에 속하는 지를 확인하기 어려운 반면에, 전원 단 부근에서 고장이 발생하는 경우 가능한 모든 해의 조합들에 대한 지표들을 확인할 수 있기 때문에 제안된 전략의 목적 지표 레벨이 어느 정도에 속하는 지를 정확하게 알 수 있다. 그림 7은 고장구간 분리, 부하분할이 이루어진 후의 계통구성을 보인다. 고장구간 이후의 다운 스트림 개폐기들은 모두 개방상태를 보인다.

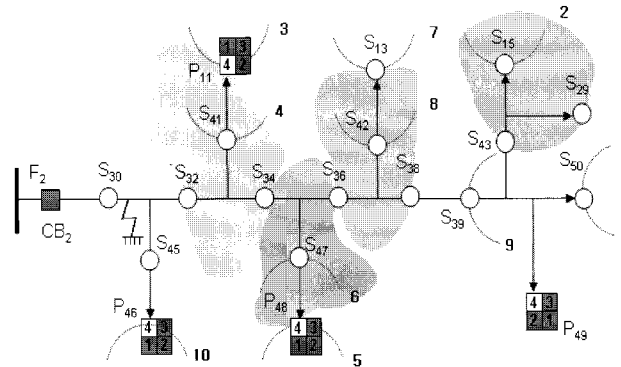


그림 7 선로 F<sub>2</sub> 사고에 대한 자율적 부하용통 솔루션  
Fig. 7 Autonomous load transfer solution for F<sub>2</sub> fault case

이때 제안된 전략에 의해서 얻어진 부하용통 전략 즉, 리클로우저 에이전트에 의해서 순차적으로 제어되는 개폐기들을 순서대로 표시하면 표 3과 같고, 이때 얻어지는 부하용통 구성은 그림 7과 같다. 그림 7에서 호의 번호는 리클로우저에 의해서 개폐기가 투입되는 순서를 표시한다. 표 3에서 부하용통구간은 투입되는 개폐기에 의해서 전원이 재 공급

되는 부하지역을 표시한다.

표 3 부하용통 전략  
Table 3 Service restoration strategy

| 제어순서 | 개폐기 ID            | 제어상태  | 부하용통구간   |
|------|-------------------|-------|--|
| 1    | S <sub>50</sub>   | Close | {S <sub>50</sub> , S <sub>39</sub> , S <sub>43</sub> } |
| 2    | S <sub>15</sub>   | Close | {S <sub>15</sub> , S <sub>43</sub> , S <sub>29</sub> } |
| 3    | P <sub>11.4</sub> | Close | {P <sub>11.4</sub> , S <sub>41</sub> }                 |
| 4    | S <sub>41</sub>   | Close | {S <sub>41</sub> , S <sub>32</sub> , S <sub>34</sub> } |
| 5    | P <sub>48.4</sub> | Close | {P <sub>48.4</sub> , S <sub>47</sub> }                 |
| 6    | S <sub>47</sub>   | Close | {S <sub>47</sub> , S <sub>34</sub> , S <sub>36</sub> } |
| 7    | S <sub>13</sub>   | Close | {S <sub>13</sub> , S <sub>42</sub> }                   |
| 8    | S <sub>42</sub>   | Close | {S <sub>42</sub> , S <sub>36</sub> , S <sub>38</sub> } |
| 9    | S <sub>39</sub>   | Close | {S <sub>39</sub> , S <sub>38</sub> }                   |
| 10   | S <sub>46</sub>   | Close | {S <sub>46</sub> , S <sub>45</sub> }                   |

그림 8과 그림 9는 각각 가능한 모든 부하용통 솔루션들 중 10,000개의 솔루션들에 대한 부하분담 균등화 지표와 선로손실 지표를 보인다.

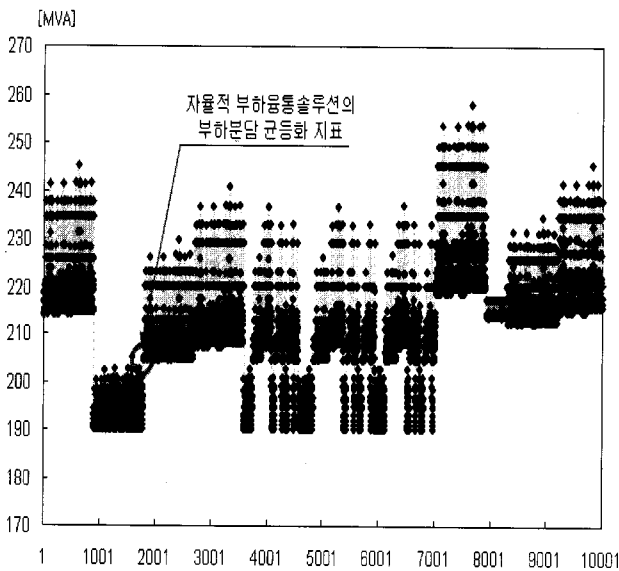


그림 8 제안된 전략의 부하분담 균등화 지표  
Fig. 8 The load balancing index of the proposed strategy

그림 8에서 ◆는 각 솔루션들의 부하분담 균등화 지표를 표시하는데, 특히, 제안된 전략에 의해서 얻어진 해는 1843 번째의 해에 해당하며 부하분담 균등화 지표는 204.95[MVA]이다. 원안의 ◆는 제안된 전략의 부하분담 균등화 지표로서 최적은 아니지만 많은 해들 중 매우 만족할 만한 수준에 들어 있음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 9에서 ◆는 각 솔루션들의 선로손실 지표를 표시하며, 원안의 ◆로 표시된 1843번째 손실 지표(163.97kW)는 제안된 전략에 근거하여 결정된 부하용통 전략의 선로손실 지표로서 매우 만족할 만한 수준에 들어 있음을 확인할 수 있다.

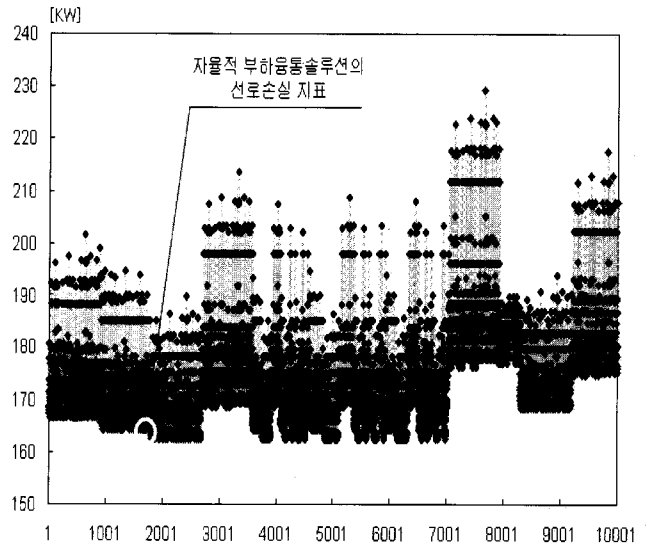


그림 9 제안된 전략의 선로손실 지표  
Fig. 9 The feeder loss index of the proposed strategy

#### 4.2.2 배전선로 F<sub>5</sub> 고장 모의

전원 단 부근의 선로구간 {S<sub>51</sub>, S<sub>53</sub>, S<sub>61</sub>}에서 일선 지락고장이 발생한 경우를 모의한다. 앞에서 설명하였듯이 전원 단 부근에서 고장이 발생하는 경우 가능한 모든 해의 조합들에 대한 지표들을 확인할 수 있기 때문에 제안된 전략의 목적 지표 레벨이 어느 정도에 속하는 지를 정확하게 알 수 있다. 그림 8은 고장구간 분리, 부하분할이 이루어진 후의 계통구성을 보인다. 고장구간 이후의 다운 스트림 개폐기들은 모두 개방상태를 보인다.

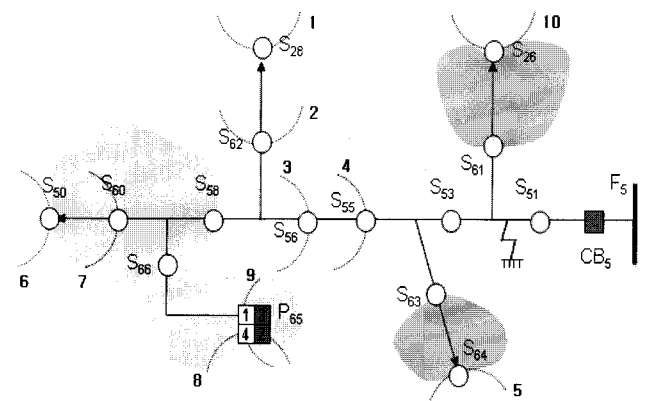


그림 10 선로 F<sub>5</sub> 사고에 대한 자율적 부하용통 솔루션  
Fig. 10 Autonomous load transfer solution for F<sub>5</sub> fault case

이때 제안된 전략에 의해서 얻어진 부하용통 전략 즉, 리클로우저 에이전트에 의해서 순차적으로 제어되는 개폐기들을 순서대로 표시하면 표 4와 같고, 이때 얻어지는 부하용통 구성은 그림 10과 같다. 그림 10에서 호의 번호는 리클로우저에 의해서 개폐기가 투입되는 순서를 표시한다. 표 4에서 부하용통구간은 투입되는 개폐기에 의해서 전원이 재 공급되는 부하지역을 표시한다.

표 4 부하용동 전략

Table 4 Service restoration strategy

| 제어순서 | 개폐기 ID            | 제어상태  | 부하용동구간   |
|------|-------------------|-------|--|
| 1    | S <sub>28</sub>   | Close | {S <sub>28</sub> , S <sub>62</sub> }                   |
| 2    | S <sub>62</sub>   | Close | {S <sub>62</sub> , S <sub>58</sub> , S <sub>56</sub> } |
| 3    | P <sub>56</sub>   | Close | {P <sub>56</sub> , S <sub>55</sub> }                   |
| 4    | S <sub>55</sub>   | Close | {S <sub>55</sub> , S <sub>53</sub> , S <sub>63</sub> } |
| 5    | P <sub>64</sub>   | Close | {S <sub>64</sub> , S <sub>63</sub> }                   |
| 6    | S <sub>50</sub>   | Close | {S <sub>50</sub> , S <sub>60</sub> }                   |
| 7    | S <sub>60</sub>   | Close | {S <sub>60</sub> , S <sub>58</sub> , S <sub>66</sub> } |
| 8    | P <sub>65.1</sub> | Close | {P <sub>65.2</sub> , P <sub>65.3</sub> }               |
| 9    | P <sub>65.4</sub> | Close | {P <sub>65.1</sub> , S <sub>66</sub> }                 |
| 10   | S <sub>26</sub>   | Close | {S <sub>26</sub> , S <sub>61</sub> }                   |

그림 11과 그림 12는 각각 가능한 모든 부하용동 솔루션들 중 3,000개의 솔루션들에 대한 부하분담 균등화 지표와 선로손실 지표를 보인다.

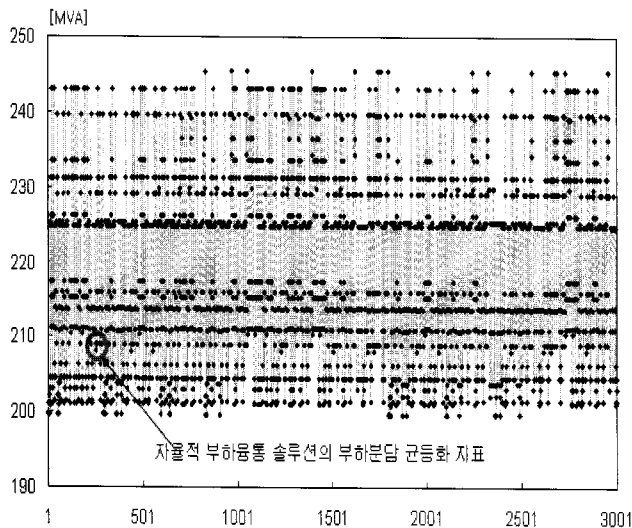


그림 11 제안된 전략의 부하분담 균등화 지표

Fig. 11 The load balancing index of the proposed strategy

그림 11에서 ◆는 각 솔루션들의 부하분담 균등화 지표를 표시하는데, 특히, 원안의 256번째 ◆는 제안된 전략의 부하분담 균등화 지표로서 208.93[MVA]를 보인다. 비록 최적은 아니지만 많은 해들 중 매우 만족할만한 수준에 들어 있음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 12에서 ◆는 각 솔루션들의 선로손실 지표를 표시하는데, 원안의 256번째 ◆는 제안된 전략의 선로손실 지표로서 168.36[kW]에 해당하는데 만족할 만한 수준에 들어 있음을 확인할 수 있다.

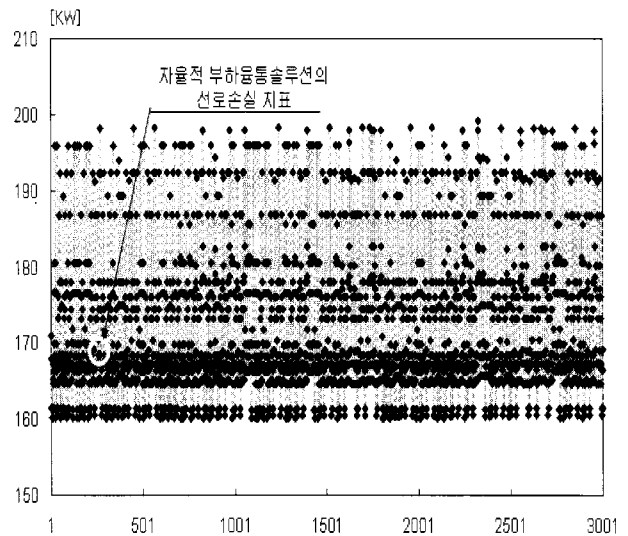


그림 12 제안된 전략의 선로손실 지표

Fig. 12 The feeder loss index of the proposed strategy

### 5. 결 론

본 연구에서는 유틸리티스 배전계통 하에서 기존 배전자동화시스템의 중앙 집중 제어방식으로 인한 데이터 집중 및 고장처리 지연의 문제점을 개선하기 위해 리클로우저를 에이전트로 하는 새로운 에이전트 기반의 자율적 고장복구 전략을 제안하였다. 제안된 복구전략에서는 에이전트가 부하용동이 완료될 때까지 매 단계별로 부하용동 개폐기를 선택하게 되는데, 매 단계에서 연계 점의 연계 개폐기들로부터 멀티 캐스팅 통신 방식에 기반하여 데이터를 수집한 후, 휴리스틱 기반 탐색전략에 근거하여 최적의 부하용동 개폐기가 선택, 투입되도록 하였다. 특히, 수집된 전압 데이터를 가지고 합리적인 레벨로 부하분담 균등화와 선로손실 최소화를 얻을 수 있는 새로운 휴리스틱이 개발되었다. 제안된 리클로우저 에이전트 기반의 자율적 부하용동 전략은 시험 배전 시스템에 대한 수개의 고장 모의에서 매우 만족할 만한 수준의 부하분담 균등화 및 선로손실 지표를 보임으로서 제안된 전략과 휴리스틱의 유효성을 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] Castro, C. H., 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] 고윤석, "배전계통의 다양한 이벤트들을 고려한 선로자동화 소프트웨어 개발", 전기학회논문지, Vol. 52A, No. 8, pp. 463-470, 2003년 8월.
- [3] 고윤석, 윤상문, 서성진, 강태규, "차세대 디지털 적산전력계 개발", 대한전기학회논문지, Vol. 21, No. 2, pp. 541-551, 2004년 8월.
- [4] 고윤석, 하복남, "차세대 디지털 적산전력계에 기반한 배전원격관리 시스템 설계 및 프로그램 개발", 전기학회논문지, Vol. 54, No. 4, pp. 185-192, 2005년 4월.
- [5] 고윤석, 김호용, 윤석열, "유비쿼터스 기반의 주택 자동화용 디지털 분전반 개발", 전기학회논문지, Vol. 57, No. 5, pp. 741-747, 2008년 5월.
- [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.