

차단기와 리클로저의 통신을 이용한 루프 배전계통의 보호협조 적용시 신뢰도 비교에 관한 연구

논문
60P-3-6

A Study on the Comparison of Reliability for Protective Coordination of Loop Power Distributions using Communication of Circuit Breaker and Recloser

이희태* · 문종필†
(Hee-Tae Lee · Jong-Fil Moon)

Abstract - The purpose of smart grid is the low CO₂ through expansion of renewable energy. To achieve the purpose of smart grid, typical radial power distribution system will be changed to loop power distribution system. The loop power distribution system have many advantages such as low power loss, low voltage drop, and increase of connection of renewable energy. In this paper, the algorithm for minimization of interrupted section of power distribution system is proposed through communication between circuit breaker and recloser in loop power distribution system. The proposed algorithm is proved through case studies about reliability evaluation

Key Words : Loop Power Distribution System, Protective Coordination, Circuit Breaker, Recloser, Reliability

1. 서론

현재 국내의 전력회사는 스마트 그리드, 인텔리전트 그리드, 마이크로 그리드 등 미래의 배전계통에 대한 마스터 플랜을 발표하고 연구개발 및 실증시험 중에 있다[1,2].

국내 배전계통의 경우 망(그리드)의 형태로 구성되어 있지만 상시개방스위치를 설치하여 방사상으로 운전하고 있다. 상시개방스위치를 닫게 되면 하나의 단일 그리드 구조가 가능하며, 현재 일부 국의 전력회사에서 루프계통을 운전하고 있으며, 국내 전력회사 또한 루프 운전을 위해 많은 연구가 진행되고 있다[3,4]. 그러나 배전계통을 그리드로 운전하게 되면 양방향 전력공급으로 인하여 기존의 보호협조 시스템을 그대로 적용할 수 없는 문제가 발생하게 된다.

즉 계통에 고장발생시 고장전류의 방향성을 감지하여 고장 구간만을 분리하기 위한 새로운 알고리즘이 필요하며, 지중배전계통의 경우에는 Multi Circuit Breaker(MCB)를 개발하여 보호협조 문제를 해결할 예정이다[5].

그러나 새로운 보호기기의 설치에 기존 배전선로가 아닌 신도시 등에 신규투자 형태로 적용될 예정이며, 기존에 운영 중인 가공 배전계통에서는 루프 배전계통의 효과를 볼 수 없는 단점이 있다.

현재 국내 배전계통은 대부분 배전자동화가 되어 있고, 리클로저와 리클로저 혹은 과전류계전기와 리클로저와의 협조를 통해 고장구간을 절체하고 있다.

기존의 연구[6]에서는 배전자동화가 되어 있는 지역에서 고장발생시 새로운 차단기 트립 알고리즘을 이용하여 양방

향 보호협조를 이룰 수 있는 방안을 제시하였다.

본 논문에서는 현재의 단방향 리클로저를 채용하고 있는 방사상 배전계통을 루프 형태로 변경하였을 경우에 대하여 기존의 보호기기를 이용하여 보호협조를 가능하게 하기 위한 통신 알고리즘을 연구하였다. 중앙제어를 통한 제어 아닌 피더의 보호기기들 간에 자체통신을 이용하여 고장전류를 인지하고 자체적으로 고장구간을 절체할 수 있는 방법을 통해 실질적으로 루프 계통에서 정전구간을 축소할 수 있고, 사례연구를 통해 신뢰도 측면에서 제안된 알고리즘 적용 시 신뢰도 이득을 평가하였다.

2. 배전계통의 보호협조

2.1 방사상 배전계통의 보호협조

일반적으로 방사상 배전계통에서 사고발생시 과전류계전기와 리클로저, 리클로저와 리클로저의 협조를 통하여 고장구간을 자동으로 분리하고 복구절차에 따라 전력을 공급한다. 그림 1은 차단기와 리클로저의 위치를 나타낸다.

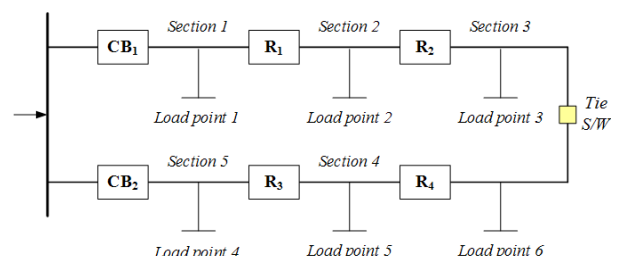


그림 1 피더에 위치한 차단기와 리클로저
Fig. 1 CBs and reclosers located in feeders

그림에서 CB는 과전류계전기에 의해 동작하는 차단기를 나타낸다. CB와 R₁사이에서 사고가 발생할 경우 과전류계전

* 중신회원 : POSCO ICT 스마트그리드추진단 과장 · 공박

† 교신저자, 중신회원 : 충주대 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : moon@cjnu.ac.kr

접수일자 : 2011년 6월 23일

최종완료 : 2011년 8월 24일

기(Overcurrent relay)나 과전류지락계전기(Overcurrent ground relay)의 트립신호에 의해 고장구간을 분리하게 된다. 재폐로(Reclosing) 기능이 있는 차단기의 경우 일반적으로 2F2D(2-fast 2-delay)동작 후 완전개방(Lock-out)된다.

만약 R_1 과 R_2 사이의 사고가 발생하면, 고장전류를 감지하는 R_1 은 재폐로를 수행하고 영구고장으로 판명되면 완전개방되어 R_1 하단 지역은 정전을 경험하게 된다.

그림 2는 그림 1에 대해 고장전류의 크기가 $I_{f,s1} > I_{f,s2} > I_{f,s3}$ 일 경우에 대한 Time Current Curve(TCC)의 예이다.

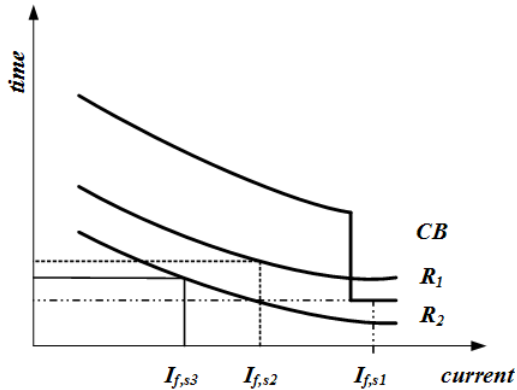


그림 2 일반적인 방사상 계통의 보호기기의 TCC
Fig. 2 TCC of protective devices for general radial system

2.2 기존 방식의 문제점

방사상 계통에 적합하게 정정되어 있는 과전류계전기와 리클로저를 그대로 루프 배전계통에 이용할 경우 고장전류를 차단한다는 보호협조에는 문제가 없다.

예를 들어, 그림 1에서 상시폐로로 운전될 경우, Section 2의 고장시 R_1 과 R_4 는 모두 자기 방향의 고장전류를 감지하여 TCC에 의해 고장전류를 차단하게 된다. 그러나 건전구간인 Section3과 같은 불필요한 정전구간이 발생하는 문제점을 지니게 된다. 또한, 고장전류의 차단이 TCC에 의해 동시에 이루어 지지 않기 때문에 그 지속시간동안 기기 및 수용가의 설비의 수명에 영향을 미치게 된다.

표 1은 상정사고시 보호기기 트립에 의해 발생하는 정전구간을 나타낸다.

표 1 상정사고시 트립 기기와 정전지역

Table 1 Tripped protective devices and interrupted sections depending on faulted section

고장구간 [section]	트립기기	정전지역 [section]				
		1	2	3	4	5
1	CB_1, R_4	■	■	■		
2	R_1, R_4		■	■		
3	R_2, R_4			■		
4	R_2, R_3				■	
5	CB_2, R_2					■

표 1과 같은 문제를 개선하기 위하여 기존에 설치되어 있는 리클로저와 차단기의 통신을 이용하여 고장구간을 정확하게 확인하고 구간절체를 신속하게 하기 위해 다음 3장과 같은 알고리즘을 제안한다.

3. 차단기와 리클로저의 통신 알고리즘 제안

배전계통을 루프로 운전할 경우, 기존의 리클로저와 차단기의 보호 메커니즘을 그대로 사용하고 추가로 보호기간 통신이 구성되어 있다면, 새로운 보호설비를 설치하는 대신 제안된 알고리즘을 통해 루프 보호협조를 이룰 수 있다.

배전자동화 지역에서 차단기와 리클로저의 통신만으로 동일한 변전소에서 구성된 피더의 루프 운전을 위한 통신선로 및 신호 흐름은 그림 3과 같다.

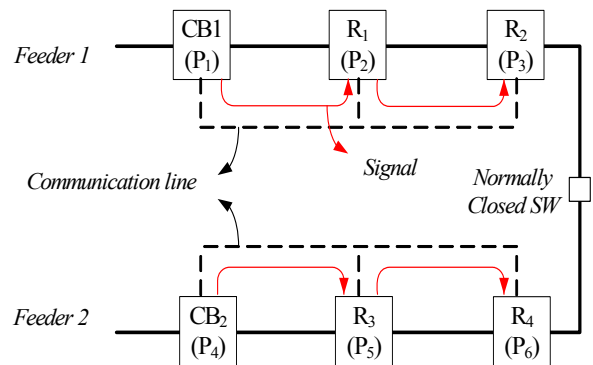


그림 3 루프계통의 통신 및 신호 흐름도
Fig. 3 Signal and communications flows of a loop system

그림 4는 루프 계통의 변전소를 기준으로 차단기와 리클로저를 순차적으로 나열을 한 경우에 대한 일반화이다.

사고에 의해 CB_1 이 트립되면 트립된 신호는 그림 3과 같이 R_1 에 보내고, 신호를 받은 리클로저는 트립을 하면 된다. R_1 의 경우 신호를 받기 전에는 트립이 되지 않았기 때문에 R_n 에 신호를 보낼 필요가 없다.

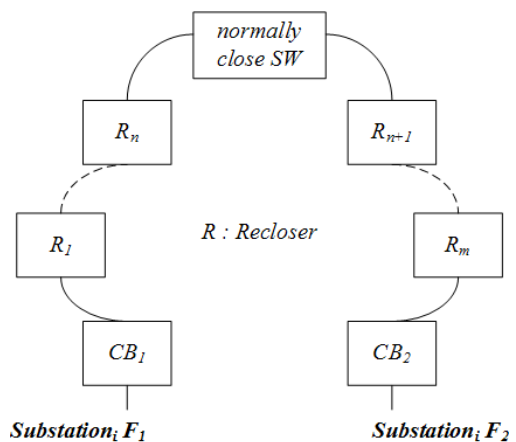


그림 4 일반화된 보호계전기들의 연결도
Fig. 4 Generalized connection of protective equipment

그림 5는 그림 4와 같이 연결된 차단기와 리클로저의 연결관계에 의해서 고장구간을 최소화 하기 위해 제안된 알고리즘을 나타낸다.

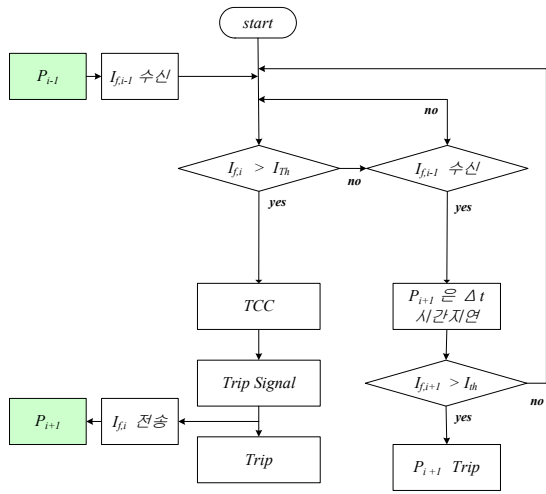


그림 5 루프계통의 제안된 보호협조 알고리즘
Fig. 5 Proposed protective coordination algorithm of a loop system

기본적으로 계통에 설치된 보호기기는 자기고장을 감지하여 TCC에 의해 고장전류를 차단하게 되어 있다. 그래서 그림 5와 같이 고장발생시 자기보호영역의 고장전류가 임계전류보다 클 경우($I_{f,i} \geq I_{Th}$) TCC에 의해 트립이 되며, 트립 신호를 전류방향으로 다음 보호기기에 전송한다.

$I_{f,i} < I_{Th}$ 이면, 자기보호영역이 아니 구간에서의 고장시 구간t 절체를 위한 트립을 판단하기 위해서 수신된 고장전류가 임계 고장전류보다 크면 트립을 수행하며, 그렇지 않을 경우 다시 처음으로 보내고, 임계전류이상이면 트립함으로써 기존의 보호시스템이 가지고 있는 정전구간의 확대를 줄일 수 있다.

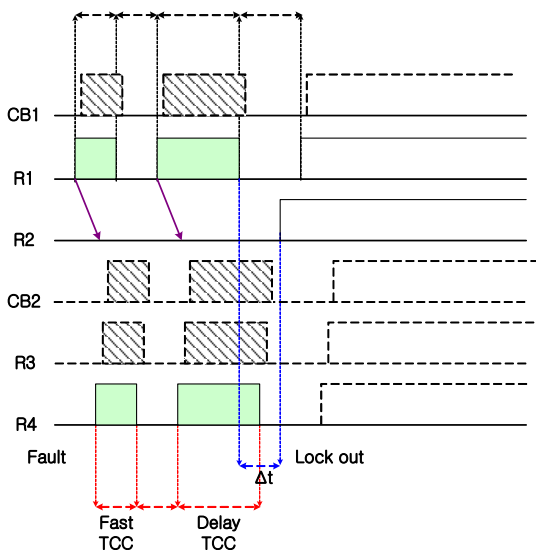


그림 6 트립신호의 시간흐름도
Fig. 6 Time flow diagram of trip signal

그림 6은 그림 1의 Section2에서 고장발생시 보호기기의 트립 순서를 나타낸다. 고장발생시 R₁과 R₄는 자기 구간 사고이므로 재폐로 동작을 수행하게 된다. 이 때 R₁은 두 번째 재폐로 후에 마지막 Lockout 수행 전에 R₂에 트립 신호를 보내게 된다. R₁은 마지막으로 Lockout되고 R₂는 상위 보호기기로부터 트립 신호를 받았으므로 재폐로 동작을 수행하지 않고 곧바로 Lockout된다. R₄는 Lockout 동작전 R₂에 의해 고장구간이 분리되었으므로 Lockout동작을 하지 않고 다시 리셋되어 정상운전하게 된다.

4. 보호협조에 따른 배전계통 신뢰도

제안된 보호협조의 이득을 분석하기 위해 영구정전 순간 정전에 의한 신뢰도 지수를 통합하여 평가하고 비교 분석하였다.

부하군이 경험하는 정전을 두 가지로 분리할 수 있다. 첫째, 구성설비의 고장이 영구고장일 경우, 부하군은 영구 정전을 경험하는 수용가와 순간정전을 경험하는 수용가로 분리할 수 있다. 둘째, 구성설비의 순간고장에 의해 부하군은 순간정전을 경험하는 수용가이다.

4.1 방사상 배전계통의 신뢰도 평가

계통의 구성설비 고장에 의해 발생된 정전은 영구정전을 경험하는 수용가와 순간정전만을 경험하는 수용가로 분리되어진다.

식 (1)은 f 피더에서 k 부하점에 정전을 야기하는 j설비의 고장에 의해 영구정전을 경험하게 되는 수용가의 등가 고장률(λ_s)과 j'설비에 의해 순간정전을 경험하게 되는 k 부하점에 고장률(λ_m)을 나타낸다. i가 0인 경우는 영구정전에 의해 정전을 경험하는 수용가의 등가 고장률을 나타내며, 1인 경우는 순간정전에 의해 순간정전을 경험하는 고장률을 의미한다.

$$\lambda_{f,k}^i = \begin{cases} \sum_{j \in F(f,k)} \lambda_j & , i=0 \text{ frequency/year} \\ \sum_{j' \in F(f,k)} \lambda_{j'} & , i=1 \text{ frequency/year} \end{cases} \quad (1)$$

$$U_{f,k}^i = \begin{cases} \sum_{j \in F(f,k)} \lambda_j r_j & , i=0 \text{ hours/year} \\ \sum_{j \in F(f,k)} \lambda_{j'} r_{j'} & , i=1 \text{ hours/year} \end{cases} \quad (2)$$

$$r_{f,k}^i = \frac{U_{f,k}^i}{\lambda_{f,k}^i} \quad , i=0,1 \text{ hours/frequency} \quad (3)$$

고장복구시간($r_{f,k}^i$)은 재폐로의 동작시간만큼 k 수용가는 순간정전을 경험하게 되며, 일반적으로 피더선로의 경우 영구 고장률의 3배만큼 순간고장이 발생되는 것을 가정하였다[7].

4.2 신뢰도 지수

본 논문에서는 대표적인 시스템 지수인 SAIFI(System Average Interruption Frequency Index), SAIDI(System

Average Interruption Duration Index), MAIFI(Momentary Average Interruption Frequency Index)와 에너지지수인 ENS를 비교대상으로 하였으며 각 지수에 대한 식은 (4)-(7)과 같다[8,9].

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_k N_k}{\sum N_k} \text{ interruptions/customer yr} \quad (4)$$

$$SAIDI = \frac{\sum \lambda_k U_k}{\sum N_k} \text{ hours/customer yr} \quad (5)$$

$$MAIFI = \frac{\sum \lambda_{mk} N_k}{\sum N_k} \text{ interruptions/customer yr} \quad (6)$$

$$ENS = \sum L_{a(k)} U_k \text{ MWh/yr} \quad (7)$$

여기서 N_k , λ_k , U_k , λ_{mk} 는 k 부하점을 구성하고 있는 수용가의 수, 고장률, 연간 정전시간, 순간고장률을 의미하며, $L_{a(k)}$ 는 k 부하점에 연결된 평균부하를 나타낸다.

5. 사례연구

5.1 사례모델

사례연구를 위한 모델 계통은 Roy Billinton Test System(RBTS) 모델을 이용하였으며, 피더선로에 의해 발생된 영향을 고려하여 평가 하였다.

모델에 대한 신뢰도 데이터는 참고문헌[9]을 이용하였다.

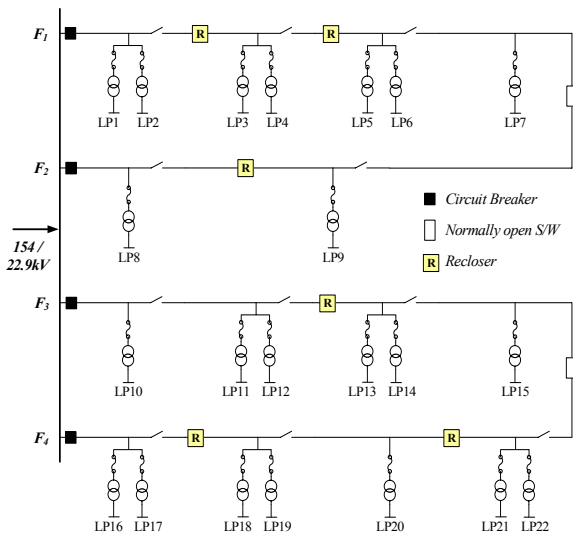


그림 7 RBTS Bus2 모델
Fig. 7 RBTS Bus2 model

사례연구는 표 2와 같이 신뢰도 비교를 위해 3가지 사례로 구분하고 비교 하였다.

표 2 사례 모델

Table 2 Case models

Case	운전방식	보호협조 방식
A	방사상 운전	방사상 보호협조
B	루프 운전	방사상 보호협조
C	루프 운전	제한된 보호협조

5.2 신뢰도 지수 비교

고장의 종류와 영향을 받는 부하점을 이용하여 대표적인 지수로 평가되는 배전계통 신뢰도 지수 중 영구정전에 의해 평가되는 SAIFI, SAIDI, ENS와 순간정전에 의해 평가되는 MAIFI의 결과는 표 3과 같다.

표 3 각 사례별 신뢰도 지수의 결과

Table 3 Results of reliability indices for each case

Case	SAIFI [ints/yr]	SAIDI [hr/yr]	ENS [MWh/yr]	MAIFI [ints/yr]
A	0.177	0.483	16.1	0.288
B	0.159	0.674	22.6	0.295
C	0.134	0.449	14.9	0.237

기존의 방사상 구조를 지닌 배전계통을 기준으로 루프 운전을 위해 동일한 보호협조를 한다면, SAIDI, ENS와 같이 계통의 고장이 발생할 경우 정전구간이 늘어남에 따라 정전 지속시간이 향상되지 못한 결과를 보였고, 이로 인해 연간 에너지 불공급량이 증가되는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 리클로저의 순간정전을 포함한 평가시 오히려 시스템의 순간정전회수가 증가하였다. 그러나 제한된 보호협조방법을 적용한 결과 기존의 방사상 배전계통보다 더욱 향상된 결과를 도출하였다.

제한된 보호협조 알고리즘을 이용한 배전계통의 루프 운전시 신뢰도 이득에 대한 향상율은 그림 8과 같다.

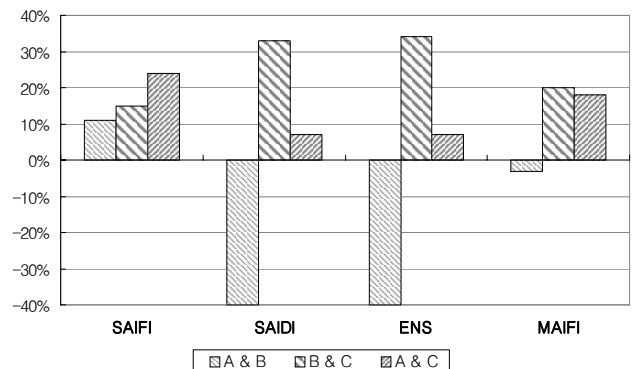


그림 8 각 사례별 신뢰도 이득 비교

Fig. 8 Comparison of reliability benefit for cases

그림에서 A&B는 사례 A와 B를 비교시 A대비 B의 신뢰도 이득에 대해 백분율로 계산된 수치이다.

제한된 보호협조에 의한 신뢰도는 기존의 방사상 배전계

통보다 SAIFI는 24[%] 개선되었고, SAIDI, ENS의 경우 7[%] 향상되었다. 순간정전을 고려한 신뢰도 지수인 MAIFI는 18[%] 향상되는 것으로 분석되었다.

6. 결 론

스마트 그리드를 구현하기 위해서는 배전계통도 루프 구조로 변경되어야 한다. 그러나 신도시와 같이 새롭게 배전 계획이 적용되는 지역에서만 투자가 이루어지므로, 본 논문에서는 기존에 설치되어 운영중인 배전자동화 지역에서의 루프 운전시 보호협조 방안을 제안하였다.

즉, 방사상 배전계통에서 적용중인 보호협조 방식을 그대로 적용하고, 원치 않는 지역에 추가적인 정전지역을 발생시키지 않기 위한 차단기와 리클로저의 통신을 이용한 방법을 제시 하였다.

제안된 방법을 이용하여 구간별 상정사고를 통해 계통의 고장에 따른 영향을 받는 수용가를 분석하였고, 3가지 사례를 비교하여 신뢰도 분석을 하였다.

그 결과 방사상 보호협조를 루프 배전계통에 적용할 경우 계통의 고장 발생시 영향을 받는 지역이 광범위하게 됨을 알 수 있었고, 상정사고시 사고가 발생한 지역만을 고장절체하기 위해 트립신호 발생시 최종적으로 트립되어야 할 보호기기를 지정하는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘을 이용한 결과 A모델에서 영구사고시 영구고장을 경험하는 수용가의 대부분을 영구고장대신 순간고장만을 경험하게 되었으며, 일부 지역은 루프구조로 변경됨에 따라 B모델에서 영구고장을 경험하는 수용가를 순간정전만을 경험하게 되어 신뢰도 측면에서 향상된 결과를 도출하였다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임

참 고 문 헌

- [1] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papatlianassiou, N. Hatzargyriou, "Making microgrids work", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 6, No. 3, 2008
- [2] B. Kroposki, C. Pink, T. Basso, R. DeBlasio, "Microgrid standards and technology development", IEEE PES General Meeting, 2007
- [3] B. Pagel, "Energizing international drive," T&D World, 2000.
- [4] Tsai-Hsiang Chen, Wei-Tzer Huang, Jyh-Cherng Gu, Guan-Chih Pu, Yen-Feng Hsu, Tzong-Yih Guo, "Feasibility study of upgrading primary feeders from radial and open-loop to normally closed-loop arrangement", IEEE Trans. Power systems, Vol. 19, No.3, 2004
- [5] <http://www.epnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=21251>
- [6] 이희태, 문종필, 김재철, "배전자동화 계통의 루프 운전시 보호협조에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 58, No. 7, 2009년 6월.
- [7] S. Y. Yun, "Reliability evaluation of power distribution systems considering the short duration undervoltage", Ph.d. dissertation of Soongsil university, 2002
- [8] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, New York, 1984
- [9] R. N. Allan, R. Billinton, L. Goel, "A reliability test system for educational purpose-basic distribution system data and results, IEEE Trans. Power Systems Vol. 6, No.2 1991

저 자 소 개



이 희 태 (李 羲 泰)

1976년 4월 2일생. 2002년 숭실대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 포스코ICT 스마트그리드추진단 과장
 Tel : 031-779-1715
 Fax : 031-779-2709
 E-mail : htlee@poscoict.com



문 종 필 (文 鍾 必)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 충주대학교 첨단과학기술대학 전기공학과 교수
 Tel : 043-841-5146
 Fax : 043-841-5140
 E-mail : moon@cjnu.ac.kr