

배전선로 재폐로 최적 기준 산정에 관한 연구

조재훈* · 이선정** · 문채주***

A Study on Determination of Optimal Reclosing Guideline on Distribution Lines

Jae-Hun Cho* · Sun-Jung Lee** · Chae-Joo Moon***

요약

선로를 따라 흐르는 전력흐름은 장기간에 걸쳐서 차단되지 않는 연속성을 갖는 것이 바람직하다. 배전선로에서 재폐로의 최적 기준은 전력계통의 신뢰성을 개선하는 것으로 알려져 있으며, 배전계통에서 보호기능은 이러한 재폐로의 수량과 위치가 매우 중요하다. 본 연구에서는 배전망 사고 동안 발생하는 손실을 줄이기 위하여 재폐로 동작 횟수를 포함한 보호기법의 사용 효과를 검토한다. 본 연구의 최종 목적은 표준 배전망에 대한 PSCAD/EMTDC의 모의데이터를 기반으로 사고전류 조건과 재폐로 동작 횟수를 결정하는 것이다. 피더의 보호기능인 재폐로기에서 동작횟수 결정은 배전망의 최적 운영과 신뢰성 확보에 도움이 된다.

ABSTRACT

It is always desirable that the continuation of power flow through the lines should not be interrupted for a long time. The optimized guideline of reclosers on distribution lines is known to improve the reliability of power systems, the protection functions on distribution systems heavily rely on the number and placement of such reclosers. This study reviewed the effect of using protection settings methodology with the number of reclosing operations to reduce the damage sustained during faults on distribution networks. The aim of the study is to determine the number of reclosing operations and fault current conditions based on simulation data of PSCAD/EMTDC for standard distribution networks. It is found that the determination of the number of operations on reclosers, which are the protection function of feeders, helped to optimize the operation and reliability of distribution networks.

키워드

Recloser, Distribution Network, Power System, Power Protection, Fault Current
재폐로기, 배전망, 전력 계통, 계통 보호, 사고 전류

1. 서론

분산전원에 해당하는 40MW 용량의 신재생에너지

설비증가에 따라 배전선로 접속용량이 포화상태에 도달하여 연계된 발전원의 사고 영향이 배전선로의 안정성을 위협하고 있다. 특히 무관성의 인버터 기반의

* 국립목포대학교 대학원(98101233@gmail.com)

** 한국전력공사(Isjssun@naver.com)

** 교신저자 : 국립목포대학교 스마트그리드연구소

• 접수일 : 2022. 04. 04

• 수정완료일 : 2022. 05. 11

• 게재확정일 : 2022. 06. 17

• Received : Apr. 04, 2022, Revised : May. 11, 2022, Accepted : Jun. 17, 2022

• Corresponding Author : Chae-Joo Moon

Smart Grid Institute, Mokpo National University,

Email : cjmoon@mokpo.ac.kr

발전원의 증가로 무효전력의 제어가 갈수록 복잡해지고 있으며, 배전선로나 송전선로에 과전압을 초래할 수 있다. 지락이나 단락사고시 PMU를 이용하여 전력조류를 측정하여 대응하기도 하지만 현재 우리나라는 자동재폐로 차단기인 재폐로기를 사용한다. 배전선로에서 사용하고 있는 재폐로기의 재폐로 시간은 회로가 개방된 후 자동적으로 폐로될 때까지의 시간으로 순시고장이 제거될 수 있는 여유를 주고 있다. 재폐로 시간은 보호기기의 정정범위 내의 값이 보호기기간 협조가능 동작시간내의 동작특성인지 여부를 검증, 즉, 진행상태를 파악할 때 적용하는 중요한 요소로서 40cycles~60초 까지 임의로 조절할 수 있다. 재폐로 방식은 회로 차단기의 트립 및 재폐로 동작이 어떻게 수행되는지에 따라 구분되며, 재폐로를 적용하는 대부분의 국가들은 계통의 정격 전압에 따라 다른 재폐로 방식을 사용하고 있다[1-4].

재폐로기는 고장이 발생하면 자동적으로 차단과 재폐로를 반복하여 순간고장일 경우에는 투입상태를 유지하고, 영구고장일 경우에는 완전개방(Lock-Out)되어 고장구간을 분리하는 배전선로의 대표적인 보호기기이다. 재폐로기의 재폐로 시간 변경은 수용가의 정전시간을 얼마만큼 단축시킬 것인가와 재폐로기의 차단능력 등을 종합적으로 고려하여 결정할 수 있다. 배전선로에서 고장발생시 미리 정해진 정정조건(최소동작전류, 시퀀스 등)에 따라 최소동작전류 이상의 고장을 검출하여 차단한다. 최소동작전류 중 상전류 정정지침은 최대 부하전류의 2.8배 이상 4.0배 이하로서 부하중·감시 과부하에 대하여 탄력적으로 자동재폐로 계전기를 운영하기 위한 값이며, 지락전류 정정지침은 부하 불평형을 고려한 값이다. 현재 재폐로기의 재폐로 시간은 2초(0.5초), 2초(5초), 15초로 사용하고 있지만, 디지털/자동화 재폐로기를 감안하면, 2초, 2초, 5초 정도로 단축해도 하드웨어적으로 큰 문제점이 없다[5-7].

지중배전선로의 특성상, 선로 공장이 7km 이내로 비교적 짧고 선로저항이 작기 때문에 고장전류가 4~9 kA로 크고, 직하와 말단의 전류차가 작기 때문에 보호기기 간의 협조를 구하기가 어려운 실정이다. 따라서, 변전소 계전기와 다회로 차단기가 동시에 동작해 버리는 보호협조의 문제점이 발생하고 있어서 이러한 문제점을 개선하기 위하여, 가장 일반적인 방법으로 변전소 계전기의 순시동작 시에 지연시간을 두

어 최소 협조시간차를 확보하여 다회로 차단기와 동시에 동작하는 것을 피하는 방법이 있고, 미국의 전력회사에서처럼 순시동작 기능을 사용하지 않고 지연동작만 사용하되, 곡선의 레벨을 하향 조정하여 순시에 준하는 동작특성을 확보하는 방법, 국제표준(ANSI)의 TC 특성곡선을 사용하는 방법 등이 제시되고 있으며, 분산형전원이 배전선로에 연계될 경우 감시설비를 이용한 보호기기의 오동작을 모의하는 방법 및 적응형 단일 폴 자동 재폐로 방식도 제안되고 있다[6],[8-10].

배전용변전소 차단기 재폐로는 지중점유율(지중공장/선로공장)에 따라 시행되고 있으며, 30% 미만인 경우 2회, 30% 이상인 경우 1회 및 100%인 경우는 0회 시행하고 있다. 즉, 지중이 100%인 경우는 영구고장 확률이 높고 파급사고 우려가 있어서 재폐로를 시행하지 않으나 99%인 경우 1회 시행한다. 재폐로 과정에서의 변압기 및 케이블 화재 등의 파급사고를 예방하기 위하여, 재폐로는 되도록 최소화하는 것이 좋으나, 이 경우 일시정전(또는 순간정전)이 필연적으로 증가할 수밖에 없어서 적정한 기준점을 찾는 것이 매우 중요하다. 특히, 최근 배전선로 지중화로 인한 지상설비와 고장전류의 증가가 이슈가 되고 있는 실정으로 본 연구에서는 지중선로 점유율을 기준으로 실제 사고에 대한 해석과 파급특성을 분석한다.

II. 배전선로 사고 이력 분석

2.1 지중점유율 선로분포

우리나라 배전선로는 2018년 기준 총 13,998개이며, 지중점유율(지중공장/선로공장, UCs)이 누락된 3개 선로(공장 0m)를 제외한 13,995개 선로를 지중점유율에 따라 분석하면 표 1과 같이 나타난다.

지중점유율 20% 미만 선로, 지중점유율 30% 미만 선로, 지중점유율 90% 미만 선로, 지중점유율 100% 미만 선로, 지중점유율 100% 선로는 각각 전체의 45%, 52%, 75%, 78%, 22%를 차지한다. 즉, 국내 배전선로는 지중점유율이 낮은 선로가 대다수임을 알 수 있다. 차단기 재폐로 1회 기준을 지중점유율 30% 미만에서 20% 미만으로 변경하는 경우, 전체 선로의 7%(984개) 선로는 재폐로 운영기준 변경의 영향을 받을 수 있다.

표 1. 배전선로 분포

Table 1. Range of distributed power lines

UCs	No. of Lines	Rate(%)
$0\% \leq UCs < 20\%$	6,314	45
$20\% \leq UCs < 30\%$	984	7
$30\% \leq UCs < 40\%$	821	6
$40\% \leq UCs < 50\%$	641	5
$50\% \leq UCs < 60\%$	521	4
$60\% \leq UCs < 70\%$	430	3
$70\% \leq UCs < 80\%$	412	3
$80\% \leq UCs < 90\%$	358	2
$90\% \leq UCs < 100\%$	482	3
UCs=100%	3,032	22
Summation	13,995	100

차단기 재폐로 0회 기준을 지중점유율 100%에서 90% 이상으로 변경하면, 전체 선로의 3%(482개) 선로는 재폐로 운영기준 변경의 영향을 받을 수 있다. 또한, 지중점유율 20% 미만인 선로는 재폐로 기준 변경에 따른 영향을 받지 않으므로 이를 제외하면, 총 7,681개의 선로가 유효한 대상선로로 선정할 수 있다.

2.2 고장전류

고장전류는 중성선을 포함하여 각상의 최대값을 나타내며, 표 2와 같이 대상고장 9,961개의 평균 고장전류(Σ각 고장의 고장전류/고장발생 건수)의 크기는 3,270A이고, 고장전류가 0kA인 1,575개를 제외한 8,386개의 평균 고장전류는 3,884A이다. 또한, 고장발생 건수가 가장 많은 고장전류의 범위는 4kA~5kA이며, 6kA를 초과하는 고장은 802개로 유효 고장발생 건수(8,386개)의 9.6%를 차지하며, 7kA를 초과하는 고장은 207개로 유효 고장발생 건수(8,386개)의 2.5%를 차지한다.

지중점유율과 고장전류 크기, 고장발생 건수에 대한 상관관계를 분석한 결과는 그림 1과 같이 나타난다. 고장전류 4kA~6kA인 고장이 자주 발생하며, 지중점유율이 낮은 경우 고장전류 범위는 다양하나, 지중점유율이 높은 경우 고장전류 3kA~6kA인 고장이 자주 발생함을 알 수 있다.

표 2. 고장전류에 대한 발생건수

Table 2. Number of event for fault current

Fault Currents(Is)	No. of Event	Rate(%)
$0(kA) < Is \leq 1(kA)$	334	4.0
$1(kA) < Is \leq 2(kA)$	821	9.8
$2(kA) < Is \leq 3(kA)$	1,379	16.4
$3(kA) < Is \leq 4(kA)$	1,723	20.5
$4(kA) < Is \leq 5(kA)$	2,002	23.9
$5(kA) < Is \leq 6(kA)$	1,325	15.8
$6(kA) < Is \leq 7(kA)$	595	7.1
$7(kA) < Is \leq 8(kA)$	167	2.0
$Is > 8(kA)$	40	0.5
Summation	8,386	100

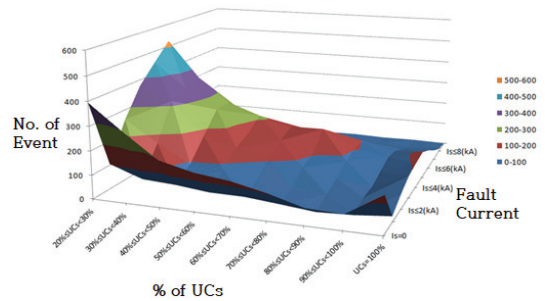


그림 1. 지중점유율, 고장전류와 발생건수에 대한 상관관계도

Fig. 1 Correlation among number of event, fault current and percent of UCs

지중점유율과 고장지속시간에 따른 고장발생 건수의 상관관계를 분석하면 그림 2와 같다. 15초 이내에 제거되는 고장이 자주 발생하며, 지중점유율이 낮은 경우 고장제거시간은 15초 이내 비율이 높으나, 지중점유율이 높은 경우 1m~3m 동안 지속되는 고장도 상당히 높음을 알 수 있다.

III. 지중점유율에 대한 고장전류 특성분석

3.1 모의조건

지중선로 점유율 및 공장에 따른 사고전류의 유형을 확인하기 위하여 그림 3과 같이 표준 배전선로를 상정하여 PSCAD/EMTDC를 사용하여 분석한다. 모의조건은 표 3과 같이 지중선로 대 가공선로 점유율을 0%, 30%, 50%, 70%, 90%, 100%로 상정하고, 사

표 4. 모의결과
Table 4. Simulation results

구 분	3상 단락전류 [kA]	1선 지락전류[kA]
Case 1	7.56	5.51
Case 2	7.90	6.00
Case 3	8.15	6.38
Case 4	8.40	6.82
Case 5	8.68	7.31
Case 6	8.82	7.59
Case 7	6.12	4.11
Case 8	6.58	4.68
Case 9	6.93	5.17
Case 10	7.31	5.77
Case 11	7.75	6.53
Case 12	7.98	6.99
Case 13	5.12	3.26
Case 14	5.65	3.83
Case 15	6.01	4.33
Case 16	6.46	4.99
Case 17	6.98	5.87
Case 18	7.27	6.45
Case 19	3.86	2.31
Case 20	4.34	2.80
Case 21	4.74	3.26
Case 22	5.22	3.91
Case 23	5.81	4.86
Case 24	6.16	5.53
Case 25	3.09	1.79
Case 26	3.53	2.21
Case 27	3.91	2.61
Case 28	4.37	3.19
Case 29	4.96	4.12
Case 30	5.32	4.82

4.2 지중점유율 20%~30% 기준

지중점유율 20%~30% 선로에 대하여 기존의 재폐로 기준인 2회를 1회로 변경하면, 순시고장 160개는 순간고장으로 확대될 수 있으며, 이는 대상고장 9,961개의 1.6%에 해당하고, 전체고장 48,241개를 기준으로 산정하면 0.3%에 해당한다. 또한, 지중점유율 20%~30% 선로 중 고장전류 6kA 이상의 고장에 대하여 재폐로를 1회만 허용하는 방식으로 규정을 변경하면, 순간고장으로 확대될 가능성이 있는 순시고장은 16개로 대폭적으로 감소하게 되고, 이는 대상고장 9,961개의 0.16%에 해당하며, 전체고장 48,241개의 0.03%를 차지하여, 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

4.3 고장전류 6kA 기준

대상고장 9,961개에서 고장전류가 0kA인 1,575개를 제외한 8,386개의 평균 고장전류는 3,884A이다. 고장전류가 6kA를 초과하는 고장은 802개이고 7kA를 초과하는 고장은 207개로 분석된다. 6kA를 초과하는 고장 802개에 대하여 재폐로를 실시하지 않으면, 대상고장 8,386개의 9.6%, 전체고장 48,241개의 1.7%가 일시고장으로 확대될 수 있다. 또한, 7kA를 초과하는 고장 207개에 대하여 CB 재폐로를 실시하지 않으면, 대상고장 8,386의 2.5%, 전체고장 48,241개의 0.4%가 일시고장으로 확대될 수 있다.

V. 결론

배전시스템의 보호기인 재폐로기에서 채용하고 있는 재폐로 시간(순시/한시)은 0.5초/2초/15초이고, 재폐로 횟수도 지중 점유율이 30% 미만과 30% 이상, 100%인 3가지 경우에 대하여 각각 2회/1회/0회로 규정하여 운영하고 있지만, 고장전류 크기별 재폐로 제한 기준이 없어, 대전류 고장 시 재폐로 시행으로 기기소손이나 사용자 설비 2차 피해 가능성이 상존하고 있다. 재폐로 과정에서의 변압기 및 케이블 화재 등의 사고를 예방하기 위하여 재폐로는 되도록 최소화하는 것이 좋으나, 그 경우 일시 정전이 필연적으로 증가할 수밖에 없어 적절한 기준점을 찾는 것이 중요하다. 최근 지상설비가 증가하면서 재폐로는 화재 및 인명안전에 있어 큰 문제가 되고 있다.

고장해석을 위하여, 지중점유율을 0%, 30%, 50%, 70%, 90%, 100%로 상정하였고, 사고위치도 1km, 2km, 3km, 5km, 7km로 상정하여 총 30가지의 경우에 대하여 사고해석을 수행하였으며, 고장전류는 지중점유율이 높을수록 그리고 공장이 짧을수록 증가함을 확인하였다.

고장해석을 통하여 지중점유율과 높은 사고전류인 경우 적용방안을 분석하였다. 지중점유율 30% 미만에 대하여 재폐로 2회를 허용하고 있으나, 지중점유율 20%~30% 선로 중 고장전류 6kA 이상의 고장에 대하여 1회로 변경하여도 재폐로 규정 변경의 영향은 거의 없다. 또한, 지중점유율 90% 이상이며 고장전류 6(kA) 이상의 고장에 대하여 재폐로 0회를 허용하는 방식으로 규정을 변경하게 되어도 재폐로 규정 변경의 영향은 거의 없다.

References

- [1] E. Kwak and C. Moon, "Analysis of Power System Stability by Deployment of Renewable Energy Resources," *J. of the Korea Institute Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 4, 2021, pp. 633-641.
- [2] S. Kim, J. Oh, O. Kim, H. Lim, and C. Moon, "A Study on Decision Plan of Hosting Capacity for distribution Feeder," *J. of the Korea Institute Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 4, 2021, pp. 653-660.
- [3] M. Kim and S. Kang, "A Study on Improvement of IEC 61850-Based Substation Restoration Scheme for Minimizing Outage Area in case of Breaker Failure," *The Transactions of the Korea Institute of Electrical Engineers*, vol. 69, no. 3, 2020, pp. 396-491.
- [4] D. Kwon, C. Moon, M. Jeong, and D. Yoo, "Analysis and Design of FRT Detection System Using PMU," *J. of the Korea Institute Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 4, 2021, pp. 643-651.
- [5] S. Kim, S. Ji, S. Kim, and D. Rho, "Operating Characteristics of Protection Coordination Devices in Distribution System Interconnected with Distributed Generation," *Korea Convergence Society*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 35-45.
- [6] H. Ahn, M. Choi, S. Bae, and J. Ryoo, "Improvement of Connection Method between Distributed Energy Source and 22.9kV Distribution Line," *Proc. of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference*, Muju, Korea, 2015, pp. 263-265.
- [7] S. Kwon and D. Rho, "A Study on Optimal Operation of Protection Devices in Distribution Systems with PV System," *Proc. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Fall Conference*, Gyeongju, Korea, 2021, pp. 1183-1186.
- [8] S. Heo, S. Kim, S. Ji, and D. Rho, "Evaluation Algorithm for Coordination Protection between Recloser and Customer Relay," *Proc. of the Proc. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Spring Conference*, Jeonju, Korea, 2011, pp. 21-24.
- [9] Y. Oh, G. Gwon, J. Park, K. Jo, S. Sohn, C. Kim, and W. Kim, "An Evaluation of Reclosing Schemes in Korea Transmission Systems Considering Transient Stability," *The Trans. of the Korean Institute of electrical Engineers*, vol. 62, no. 6, 2013, pp. 731-736.

- [10] J. Han, C. Lee, and C. Kim, "Adaptive Single-Pole Auto-Reclosing Scheme Based on Secondary Arc Voltage Harmonic Signatures," *Energy*, vol. 14, issue 1311, 2021, pp. 1-18.

저자 소개

조재훈(Jae-Hun Cho)



1990년 영남대 공학사, 2006년 핀란드 알토대 경영학석사, 1998년 한국전력공사에 입사하여 2021년 ~ 현재 배전운영처 배전운영실장, 2021년 ~ 현재 국립목포대학교 대학원 전기공학과

영암지사 배전운영부장, 전력수급처 EERS운영부장, 광산지사 전력공급부장 등을 역임

※ 관심분야 : 태양광발전시스템, 전력계통시스템

이선정(Sun-Jung Lee)



2004년 경북대 공학사, 2020년 서울과학종합대학원 경영학석사, 2003년 한국전력공사에 입사하여 2016년 ~ 현재 배전운영처 배전계통부, 배전운영실 차장

남서울본부 안전품질차장, 경산지사 배전운영차장 역임

※ 관심분야 : 배전선로보호협조시스템, 재생에너지 배전망운영시스템

문채주(Chae-Joo Moon)



1981년, 1983년 및 1994년 전남대학교 공학사, 공학석사, 공학박사 1997년 ~ 현재 목포대학교 공과대학 전기 및 제어공학과 교수 2017년 ~ 현재 에너지밸리산학융합원장

한국전력기술(주) 책임연구원, 광주일보 테마칼럼니스트, 전력전자학회 부회장, 이투스 및 한국전기신문 칼럼니스트, 기초전력연구원 에너지밸리분원장 역임

※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 전력변환시스템, 전력시스템