

배전시스템에서 적응재폐로방식의 적용에 관한 연구

임성정 · 김재철
 숭실대학교 전기공학과

Applications of an Adaptive Reclosing in Power Distribution Systems

Seong-Jeong Rim · Jae-Chul Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - This paper presents an adaptive reclosing scheme to improve the reliability in power distribution systems. For an originated faults, this scheme can determine the number of reclosing attempts, so that minimizes the affect of electric facility and customers' load. To verify the effectiveness of the proposed scheme, numerical simulation which calculates a various indices to consider the reliability and the effect of electric facility, is carried out with actual field data. Results show that the proposed scheme can be applicable to field operation.

1. 서 론

전력회사에서는 배전시스템에서 공급신뢰도의 향상을 궁극적으로 정전의 최소화이다. 그러나 오늘날 대부분의 전력 수용가에서는 순간 전압강하와 순간 과전압과 같은 민감한 전압의란에 심각한 영향을 받게 되었다[1-8]. 신뢰도 향상을 위해 사용하는 재폐로방식은 영구정전을 최소화하는데 효과적인 보호방식이다[9-11]. 그러나 이 방식에서는 전력기기, 순간전압변동에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문에 정전피해 최소화를 위한 기존의 재폐로방식에 대한 개선이 필요하다[12-14].

본 논문에서는 영구정전 및 순간전압변동의 피해를 최소화할 수 있는 적응 재폐로방식을 제안하였다. 제안된 방식은 기존의 방식에 대해서 재투입시 고장전류에 의한 전력기기의 충격과 인근 공급선로상의 순간전압강하에 의한 정지의 피해에 대한 정량적 평가와 이러한 영향을 최소화할 수 있다. 적응 재폐로방식은 고장전류의 크기 와 고장형태에 따라 재폐로 시도횟수와 재폐로 시간을 조정하는 방식이다. 정량적 해석을 위해 기존의 신뢰도 지수와 전력품질 지수 및 새로운 지수를 사용하여 평가 하였으며, 변전소 사고데이터의 통계처리를 통해 제안된 방식을 검증하였다.

2. 배전시스템의 재폐로방식

뇌, 스위칭 썬지, 바람, 동물, 나무흔과 같은 원인에 의한 과도성질로 배전선로 사고의 대부분은 일시사고가 차지한다. 이러한 근거로부터 사고발생시 시스템을 영구히 개방하기 전에 전원을 재공급하기 위하여 자동적으로 몇회 재투입하고, 사고전류의 측정, 차단하기 위한 보호 방식을 재폐로방식이라고 한다. 배전시스템에서 재폐로 방식의 특성을 고찰하기 위하여 그림 1과 같은 전형적인 방사상 배전시스템을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 45/60(MVA) 전력용 변압기 2 차측 모선에서 여러 개의 공급선로(feeder)가 인출되며 각 선로에서 주상 변압기를 통해 수용가측에 전력을 공급한다. 공급선로 1의 CB1은 차단기로서 사고제거장치를 나타낸다. 배전용 주상 변압기 2차측에 연결된 부하는 전형적인

수용가측 부하와 민감부하로 구성되어 있다고 설정하였다.

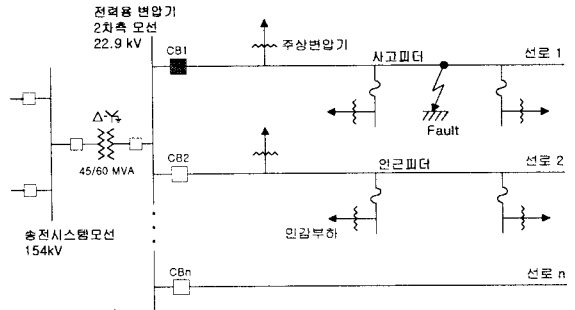


그림 1. 방사상 배전시스템

그림 1의 선로 1에서 사고가 발생하면 재폐로 계전기(reclosing relay)에서 고장을 검출하여 CB1을 개방하고 일정시간 경과후 다시 CB1 차단기를 재투입한다. 이때 재폐로 계전기에서 고장전류가 검출되지 않으면, 재폐로가 성공하여 전력공급을 지속시키며, 고장전류가 검출되면, CB1 차단기를 다시 개방시키게 된다. 사고선로에서는 순간정전과 더불어 연속적인 전력공급으로 공급신뢰도가 향상된다.

3. 재폐로에 따른 영향 평가

3.1 신뢰도 평가

배전시스템의 신뢰도를 평가하기 위하여 사용하는 신뢰도지수는 그 선정이 매우 중요하다. 특히 재폐로방식에 따른 신뢰도의 영향을 평가하기 위한 신뢰도지수는 그에 대한 영향을 고려되어야 한다. 재폐로방식이 수용가측에 미치는 영향은 영구정전횟수와 영구정전시간 모두 영향을 고려할 수 있지만, 순간정전횟수에 따른 정전시간의 산출은 매우 어려우므로, 본 연구에서는 시스템 평균 정전횟수를 사용하여 재폐로방식에 따른 신뢰도의 영향을 평가하였다[15-17].

시스템 평균 정전횟수는 재폐로가 성공하면 그 횟수가 감소하게 되므로 재폐로 시도횟수에 대해서도 고려해야 한다. 식(1)은 기존의 재폐로에 있어서 재폐로 시도횟수를 1회 늘리거나, 줄였을 경우 시스템 평균 정전횟수를 반영해 준다.

$$SAIFI_r = SAIFI_o \times \left(1 - \sum_{j=1}^{N_{RC}} R_{S(j)} \right) \quad (1)$$

여기서, SAIFI_o : 시스템 평균 정전횟수

N_{RC} : 재폐로 시도횟수

R_{S(j)} : j번째 재폐로 시도시 성공률

식(1)에 있어서 SAIFI_o는 재폐로를 시도하지 않았을 경우, 시스템 평균 정전횟수를 나타내며, 이때 정전 영향받는 수용가수는 1개 선로에 연결된 수용가로 설정하

었다. 이는 선로 인출부에 있는 재폐로 차단기를 사용하여 고장구간을 분리, 복구한다는 가정조건을 가지기 때문이다.

3.2 변압기 충격의 평가

재폐로에 의한 전력설비의 충격 평가는 재폐로를 시도하였을 경우 전력설비가 받는 피해정도를 정량적으로 평가하는 것이다. 이를 위해서 사고시 전력설비 수명과 고장지속시간과의 관계를 이용하여 설비가 받는 피해정도를 나타내는 설비충격지수(Electric Facilities Impact Index : EFII)를 도입하였다. 사고 k에 대한 전력설비의 수명이 L_k 이고 사고 k의 지속시간이 D_k 이면 사고 k에 대한 충격지수 $EFII(k)$ 는 식(2)와 같이 표현될 수 있다[18-20].

$$EFII(k) = \frac{D_k(\sigma_k, y_k)}{L_k(\sigma_k, y_k)} \quad (2)$$

여기서, σ_k : 사고 k에 대한 기계적 스트레스 [psi]

y_k : 사고 k발생시의 단위 노화계수 [p.u.]

식(2)는 사고 k에 대한 전력설비의 피해정도를 나타내는 것으로서 k에 대한 충격지수의 누적이 1이 되면 전력설비가 파손됨을 나타낸다.

3.3 전력품질의 평가

재폐로에 의한 순간정전은 재폐로 성공시 사고선로에서 발생하는 일시적인 정전을 의미하며, 순간전압강하는 고장 발생시와 고장이 제거되지 않은 상태에서의 재폐로 시도시 인근선로에서 발생하는 일시적인 전압강하를 나타낸다. 이러한 영향은 기존의 신뢰도지수에서는 평가할 수 없기 때문에 본 연구에서는 재폐로에 따른 전력품질을 평가하기 위해 새로운 지수를 제시하였다[21-22]. 식(3)은 순간정전과 순간전압강하에 영향받는 수용가수를 토대로 연간 수용가에서 이들 전력품질문제 발생횟수를 산출하기 위한 시스템 평균 전력품질문제 발생횟수(System Average Power Quality Problem Frequency Index : SAPQFI)이다.

$$SAPQFI = \frac{\sum_{i=1}^{NF} \left\{ \left(\lambda_i \cdot N_i \sum_{j=1}^{N_k} R_{S(j)} \right) + \left(\lambda_i \sum_{k=L+1}^{N_k} N_i(\rho_k, W_k) \cdot \left(1 - \sum_{j=1}^{N_k} R_{S(j)} \right) \right) \right\}}{\sum_{i=1}^{NF} N_i} \quad (3)$$

여기서, NF : 주변압기 2차측에 연결된 공급 선로수

λ_i : i 선로에서의 사고발생횟수

N_i : i 선로의 수용가수

ρ_k : 순간전압강하에 의해 부하연속운전확률

W_k : 선로에 연결된 민감부하의 구성비율

식(3)에서 $N_i(\rho_k, W_k)$ 는 재폐로에 의해 인근선로에서 순간전압강하가 발생하였을 경우 사고전류의 크기와 사고형태를 고려한 항목이다. 사고전류의 크기와 전압강하의 크기는 비례하므로 사고전류가 클수록 민감부하가 정지될 확률은 높아진다.

4. 적응 재폐로방식

전력설비 충격과 수용가측 피해를 최소화하기 위하여 이들 영향의 평가와 더불어 적절한 재폐로 시도횟수와 재폐로 시간을 선정할 필요가 있다. 그러나 기존 재폐로 방식은 고정된 재폐로 시도횟수와 재폐로 시간을 적용하

기 때문에 수용가와 전력설비는 필요이상의 피해를 입게 된다. 제안된 재폐로방식은 고장전류의 크기에 따라 재폐로 시도횟수와 재폐로 시간을 변경하는 적응 재폐로방식을 제안하였다. 여러 가지 다양한 사고상태에 따라 이에 따른 설비충격과 수용가측 피해를 평가하는 동안, 적응 재폐로 계전은 적절한 재폐로 시도횟수와 재폐로 시간을 제공해야 한다. 이러한 형태를 수행하기 위하여 그림 2와 같은 구조의 적응 재폐로방식을 구성하였다.

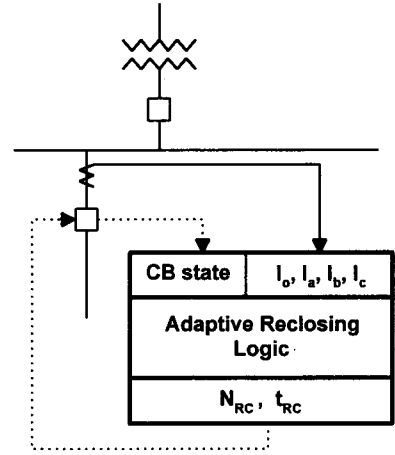


그림 2. 적응 재폐로방식의 구조

적용 재폐로방식의 구조에 있어서 입력은 각 상의 사고전류와 차단기 상태를 받아들여 이에 대한 영향을 평가한 다음, 적절한 재폐로 시도횟수(N_{RC}), 재폐로 시간(t_{RC})을 출력한다. 배전시스템에서 제안된 재폐로방식을 수행하기 위하여 적응 재폐로 알고리즘은 그림 3에 나타내었다.

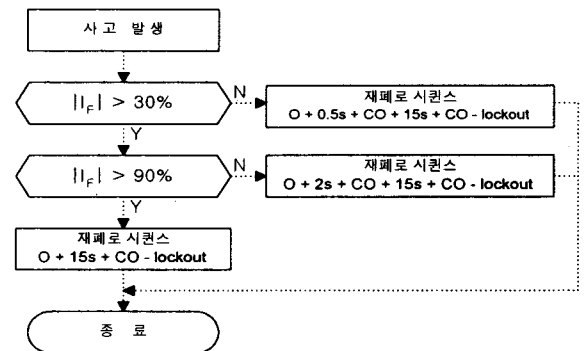


그림 3. 적응 재폐로 알고리즘

그림에서 보는 바와 같이 사고전류가 최대고장전류의 0~30% 사이인 경우, 2회 재폐로를 수행한다. 이 시퀀스에서 첫 번째 재폐로 시간을 0.5(sec)로 조정하여 순간전압강하가 적은 경우에 민감부하의 정지확률도 적기 때문에 일반부하에 대하여 순간정전에 대한 영향을 줄이기 위해서이다. 고장전류가 최대고장전류의 31~90%사이인 경우에는 2회재폐로를 수행하지만 여기서의 첫 번째 재폐로시간을 2(sec)로 조정하였다. 고장전류가 최대사고전류의 91%이상인 경우에는 1회재폐로만을 수행하도록하여 변압기의 전기적 충격을 최소화하게 한다. 제시한 방식에 대한 개선효과는 사례연구를 통하여 설명하였다.

5. 사례연구

제안된 방식의 효율을 검증하기 위해서 실제통데이터

[23]를 사용하여 재폐로방식별 신뢰도, 전력품질 및 설비충격에 대한 영향평가를 수행하였다. 신뢰도 평가에 있어서는 재폐로 시도횟수에 따른 영구정전 발생횟수를 산출하기 위하여 시스템 신뢰도 지수인 시스템 평균 정전횟수(SAIFI)를 사용하였다. 전력품질 평가는 새로이 도입한 전력품질지수인 시스템 평균 전력품질 발생횟수(SAPQFI)를 사용하였다. 도입한 평가지수는 재폐로 시도횟수와 재폐로 시간에 따른 순간정전과 순간전압강하에 대하여 수용가측 민감부하에 대한 영향을 반영할 수 있다. 설비충격에 대한 평가는 설비충격지수(EFII)를 사용하여 재폐로 시도횟수와 고장전류크기에 따른 변압기 수명관계를 산출하였으며, 이들 영향의 평가는 다음의 표 1에 수록하였다.

표 1. 재폐로방식별 평가지수 계산결과

평가지수	기존의 방식	제안된 방식
EFII	0.01697	0.01046
SAIFI	0.50	0.51
SAPQFI (0%)	1.31	1.31
SAPQFI (20%)	3.04	3.00
SAPQFI (40%)	4.76	4.69
SAPQFI (60%)	6.49	6.39
SAIFI+SAPQFI(0%)	1.81	1.81
SAIFI+SAPQFI(20%)	3.54	3.51
SAIFI+SAPQFI(40%)	5.26	5.20
SAIFI+SAPQFI(60%)	6.99	6.89

표 1에서 보는 바와 같이 설비 누적충격량 EFII는 기존 재폐로방식에 비하여 설비 누적충격량의 감소함으로서 전력설비 신뢰도를 개선함을 나타내었다. 시스템 평균 정전횟수(SAIFI)는 제안된 방식이 기존의 방식에 비해 약간 저조하다. 그러나, 제안된 재폐로 방식을 적용하였을 경우 주변압기의 피더에서 인출되는 모든 수용가에서 경험하는 영구정전은 적어지므로 기존 신뢰도개념에 있어서 공급신뢰도가 향상됨을 알 수 있다. 이러한 효과는 순간정전과 순간전압강하에 대하여 수용가측 부하가 정지된다면 이러한 영향도 고려한 것이다. 즉 순간정전이나 순간전압강하와 같은 전기적 외란이 영구정전과 동일한 피해를 미친다면 신뢰도지수에 시스템 평균 전력품질 발생횟수(SAPQFI)도 포함시킬 수 있다.

따라서 순간정전이나 순간전압강하의 영향을 모두 고려해야 하는 지역의 경우에는 적용 재폐로방식을 적용하는 것이 공급신뢰도 향상이 기대된다.

6. 결 론

본 논문에서는 전력설비의 충격과 수용가측 피해를 최소화 즉, 공급신뢰도를 향상시키기 위한 "적용 재폐로방식"을 제시함으로써 기존 재폐로방식에 비하여 제안된 적용 재폐로방식이 전력설비의 충격과 수용가측 피해를 개선시킬 수 있음을 입증하였다.

또한, 재폐로에 의한 영향 평가를 위하여 제시한 평가 모델은 배전선로 재폐로 시도횟수와 재폐로 시간의 제어 뿐만 아니라 최근 활발한 연구가 진행중인 전력품질에 대한 평가지수에 활용할 수 있다.

(참 고 문 헌)

[1] D.D.Sabin and A.Sundram, "Quality enhances reliability", *IEEE Spectrum*, Vol.33, No.2, pp.34-41, Feb. 1996.
 [2] R.C.Dugan et al., *Electrical power systems quality*, McGraw-Hill, 1996.
 [3] 임성정 외, "재폐로에 의한 수용가측의 영향", 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp.740-742, 1996년 7월.

[4] 홍우기 외, 배전계통의 순간전압강하 대책에 관한 연구, 한국전력공사 기술연구원, KRC-85S-T04, 1986.
 [5] Y.Sekine et al., "Present state of momentary voltage dip inferences and the countermeasures in Japan", *CIGRE* 36-206, September 1992.
 [6] C.Becker et al., "Proposed chapter 9 for predicting voltage sags(dips) in revision to IEEE Standard 493, the Gold book", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.30, No.3, May/June 1994.
 [7] 임성정 외, "배전시스템에서의 순간전압강하 분석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(PSP12), pp.954-957, 1997년 7월.
 [8] 임성정 외, "자동재폐로에 의한 순간전압변동에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(PSP14), pp.962-965, 1997년 7월.
 [9] IEEE PSRC Committee, "Distribution line protection practices- Industry survey analysis", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-102, No.10, pp.3279-3287, October 1983.
 [10] IEEE PSRC Committee, "Distribution line protection practices- Industry survey analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.3, No.2, pp.514-524, April 1988.
 [11] IEEE PSRC Committee, "Distribution line protection practices- Industry survey analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, No.1, pp.176-186, January 1995.
 [12] L.Johnston et al., "An analysis of VEPCO's 34.5kV distribution feeder faults as related to through fault failures of substation transformers", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-97, No.5, pp.1876-1884, September/October 1978.
 [13] 김재철 외, "전력용 변압기 사고감소에 관한 연구(1)", 한국전력공사 기술연구원, KRC-88S-J04, 1989.
 [14] A.P.Apostolov et al., "Intelligent reclosing for overdutied breaker", *IEEE Trans. on PWRD*, Vol.10, No.1, pp.153-158, Jan. 1995.
 [15] C.M.Warren, "The effect of reducing momentary outages on distribution reliability indices", *IEEE Trans. on PWRD*, Vol.7, No.3, pp.1610-1617, July 1992.
 [16] R.C.Settembrini, J.R.Fisher, and N.E.Hudak, "Reliability and quality comparisons of electric power distribution systems", *IEEE Transmission and Distribution Conference*, Dallas, pp.704-712, 1991.
 [17] 한성호, 이욱, 김재철, "배전계통의 해석적 공급 신뢰도 평가 프로그램 개발", 조명·전기설비학회, 제9권, 5호, pp.64-70, 1995년 10월.
 [18] R.J.Densley, R.Bartnikas, and B.S.Bernstein, "Multiple stress aging of solid-dielectric extruded dry-cure insulation systems for power transmission cables", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.9, No.1, pp.559-571, January 1994.
 [19] W.J.McNutt and M.R.Patel, "The combined effects of thermal aging and short-circuit stresses on transformer life", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-95, No.4, pp.1275-1286, July/August 1976.
 [20] W.J.McNutt, "A Proposed functional life test model for power transformer", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-96, No.5, pp.1648-1656, Sept./Oct. 1977.
 [21] 임성정 외, "최적 재폐로방식 선정에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(PSO37), pp.861-863, 1997년 7월.
 [22] Jae-Chul Kim et al., *A study for the optimal reclosing method on the transmission and distribution line*, KEPRI-95Y-J18, 1998.
 [23] 보호계전기 동작월보 (1991.1-1994.12), 한국전력공사 J변전소.