

전력계통의 고장 및 보호계전기 동작에 대한 분석

김호표  
한국전력공사

박응주  
한국전력공사

The Analysis of Fault and Relay Operation in System of Power Network

Ho-Pyo Kim  
KEPCO

Eung-Ju Park  
KEPCO

**Abstract** 전력시장개방에 따라 전력계통 효율적 운영에 대하여 국민적 관심이 증대하고, 경제 회복으로 인하여 전력수요가 꾸준히 증가하고 있다. 따라서 전력계통에서 발생한 고장을 정밀분석하고 문제점 파악 및 대책 등을 강구 시행하여 전기품질 향상에 일조하고자 현재 전력계통에서 운전중인 154kV이상 송변전 설비의 고장 및 보호계전기의 동작상태를 대상으로 다양한 통계 방법을 이용하여 분석을 실시 하였다.

가 발생한다. 또한 이 논문에 나타난 통계자료에 자연 환경, 계통상황 등을 고려해야 할 경우가 있다. 「2.2 설비별 고장」에서 보여주듯이 선로에 집중되어 고장이 발생하는 원인 등이 그러하다. 이러한 통계상의 문제점을 최소화 하기 위해서는 하나의 원인을 계속적으로 여러 가지 경우로 더욱 세분하여 통계 분석하는 방법을 사용하면 어느정도 효과 있는 통계 분석과 대책을 마련 할 수 있을 것으로 생각되며 가능한 통계분석을 세분화 시켜야 한다.

1. 서 론

본 논문에서는 「그림 1」과 같이 2001년도 송변전 설비의 고장을 고장종류(단락, 지락)별 분석, 설비별 고장 점유율, 송전선로 회선별 고장 발생률, 고장 원인별, 일기별, 월별 고장 빈도율 등 6가지 유형과 송변전 설비 보호계전기 평균 정동작율, 설비 단위별 보호계전기 정동작율, 연도별 정동작율 추이, 고장계기시간(보호계전기 응답시간), 보호계전기 동작요소별, 재페로 계전기 상공률, 보호계전기 제작사별 동작점유율 비교, 보호계전기 오동작 원인 등 11가지 유형으로 통계 분석을 실시하고, 과거 사례와 비교 분석하여 실제적인 전력계통 고장분석자료로 활용할 수 있도록 하였다.

2.1.1 고장종류(단락, 지락, 단지락)

'01년도 전체 고장건수는 총 332건이 발생하였으며 분석 결과 지락 196건(59.0%), 단락73건 (22.0%), 단지락 63건(19.0%)순으로 나타났다. 이는 '00년 통계 분석치인 지락73.6%, 단락15.8%, 단지락 10.6%에 비해 지락고장은 14.6%가 줄고, 단락은 6.2% 늘고 단지락은 3.20%늘어난 경향을 보였다. '99년 통계 분석치를 보면 지락 58.6%, 단락 11.8%, 단지락 29.6%로 나타나 '00년 통계치와 다른 변화를 보여 전기적 고장종류는 특별한 함수를 알 아 낼 수 없었다. 이는 통계 분석방법 및 통계자의 주관의 차이 (분석이 어려운 경우 또는 고장이 지락에서 단락으로 진전되는 경우에 통계분석에 어떻게 반영하는가에 대한 차이)등이 통계의 차이를 발생 할 수 있어 통계의 기준을 분명히 하는 것이 무엇보다 필요하다. '00년에는 자료부족으로 단지락 고장구분이 안되어 통계에서 제외된 사례가 있었지만 '01년에는 단락 지락 고장 구분이 불확실한 경우가 없어 일단 분석의 정확도가 높다 하겠다.

지락고장의 경우 전체 고장 중 대략 3년간의 평균적으로 60~70%를 차지하고 「2.1.2 송전선로 재페로 계전기 동작분석」에서 알 수 있듯이 재페로 성공률이 85.86%점을 고려할 때 고장의 대부분이 순간 고장이며, 지락고장인 것을 알 수 있다. 전력시스템을 설계할 때 순간 지락고장이 차지하는 비율을 고려하는 것도 매우 중요하다.

2.1.2 설비별 고장

'01년 154kV이상 송변전 설비중 송전선로, 모선, 변압기의 실 고장건수는 총 332건으로 송전선로 고장이 288건으로 86.75%를 차지해 변압기27건(8.13%), 모선17건(5.12%) 등에 비해 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 통계분석 대상인 운전 현황('01.12.31기준)을 보면 154kV이상 변압기 [1,441 M.TR(3상기준)], 선로[1350T/L], 모선[1210(2BUS / 1S/S)]순으로 고장발생 빈도 순 하고 다른 경우를 볼 수 있다. 설비 수량 면에서는 비슷하지만 고장발생빈도가 선로에서 높은 것은 산악지대에 있는 등 자연에 노출되어 낙뢰 또는 태풍, 산불 등이 발생할 확률이 높은 것이다.

2.1.3 송전선로 회선별 고장 점유율

'01년 송전선로 고장 288건에 대한 통계분석결과 1회선고장(209건)72.6%, 2회선고장(79건) 27.4%의 점유율을 보였다. 이는 '00년 통계치(각각 72.2%, 27.8%), 99년 통계치(각각 70.1%, 29.9%)와 거의 유사하다. 이 통계로 보아 약 4건의 고장 중 1건은

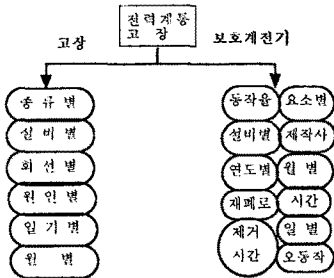


그림 1. 분석 구조

2. 본 론

2.1 전력계통 고장 및 보호계전기 동작에 대한 분석

이 논문에서 나타난 통계자료중 송변전 설비고장이란 송전선로, 변압기, 모선 등 3가지의 설비에 실제 발생한 고장을 말하며, 모선용 피뢰기는 모선고장에, 선로에 부착된 PT는 선로에 포함하여 「2.1.1」 ~ 「2.1.6」 항목의 통계 분석에 사용 하였으며 보호계전기의 오동작 또는 인적실수에 의한 정전 등은 송변전설비 고장통계의 범위에서 제외하였다. 즉, 설비에 직접적으로 전기적 고장현상이 발생한 경우에 한하여 설비고장 통계에 반영 하였다. 다만, 「2.1.7」 ~ 「2.1.9」, 「2.1.11」 ~ 「2.1.17」 항목의 보호계전기 동작을 분석 등에서는 통계 특성상 보호계전기 오동작에 의한 동작건수도 통계자료로 이용하여 설비 고장건수와 보호계전기 동작건수가 차이

ROUTE고장이 발생하므로 전력시스템 설계 및 운영시 2회선 동시고장을 고려하여야 할 것으로 분석되었다.

#### 2.1.4 원인별 고장분석

총고장 332건중 자연재해(낙뢰, 폭설, 산불 등) 247건(74.40%), 이물접촉(비닐류접촉, 조류감전, 포크레인 등) 32건(9.64%), 기기불량(노후 등) 29건(8.73%), 기타(원인불명 등) 24건(7.23%)으로 통계 분석 되었다. 산불, 조류에 의한 고장, 포크레인 접촉 및 기기불량, 회로오결선, 오동작 등에 대하여 지속적으로 철저한 고장재발 방지 대책을 수립·시행함으로써 고장을 감소할 수 있을 것으로 분석 되었다.

#### 2.1.5 일기별 고장분석

총고장 332건을 대상으로 고장당시의 날씨에 따라 통계 분석한 결과 비(낙뢰) 184건(55.42%), 맑음 69건(20.78%), 눈 66건(19.88%), 흐림 13건(3.92%) 순으로 분석되어 일기에 따라 고장 발생이 좌우되는 것을 다시 한번 확인할 수 있었다.

#### 2.1.6 월별 고장 발생 빈도 및 분석

송변전설비의 월별 고장발생 빈도는 「2.5 일기별 고장분석」에서 보여주듯이 일기와 매우 밀접한 관계가 있다. 총고장건수 332건중 1월에 58건(17.47%) 7월에 125건(37.65%), 8월에 51건(15.36%)으로, 이 시기(3개월)에 고장의 약70%가 집중됨을 알 수 있다. 1월은 예상치 않은 폭설, 7월,8월은 우수기에 따른 낙뢰 등 자연재해의 영향인 것으로 나타났다. 00년 통계분석치와 비교하면 '01년에는 7월에 고장이 집중되고, 00년도에는 8월에 고장발생이 가장 많아 매년 7월 8월 2개월은 우기에 따른 자연재해 영향에 대비하여야 하였다. 또한 00년도에는 폭설로 인한 영향이 거의 없었으나 '01년에는 예상치 않은 폭설로 1월에 고장이 증가하였다. 월별 고장분석 결과 중 또 하나 특이한 것은 '00년도에는 계절 특성상 입산객이 빈번해지는 4월에 고장이 57건(20.99%) 발생하여 실화에 의한 산불발생이 많기 때문인 것으로 추정되었는데 '01년 4월에는 10건(3.01%)으로 급속히 감소 되었다. 이는 산불예방을 위한 홍보 및 국민의식 향상에 기인한 것으로 판단되며 인적실수에 의한 고장은 효율적인 고장 예방활동 여하에 따라 감소할 수 있다는 사실을 보여주는 좋은 사례 이다.

#### 2.1.7 송변전 보호계전기 평균 정동작율

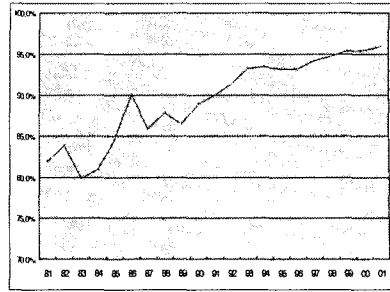
2001년도 154kV이상 송변전설비(모선, 선로, 변압기)의 보호계전기 평균 정동작율은 95.87%로 '00년에 비해0.45%증가 하였다. 보호계전기 총동작건수는 920건이며 정동작건수는 882건 오동작건수는 38건으로 분석되었으며, 보호계전기 부동작은 발생하지 않았다.

#### 2.1.8 설비 단위별 보호계전기 정동작율

2001년도 154kV이상 송변전설비 단위별 보호계전기 정동작율은 선로 97.42%, 모선 86.36%, 변압기 70.45%로 통계 분석되었다. 선로고장이 전체고장의 86%이상을 차지하는 많은 고장에도 불구하고 송전선로의 보호계전기의 정동작율이 높은 것은 '90년초기부터 꾸준히 정동작 신뢰도 향상을 위해 디지털화의 추진등 성능향상(디지털화 72% '01.12.31기준)이 이루어졌기 때문인 것으로 분석 되었으며 모선고장에 비해 변압기 고장시 보호계전기 정동작율이 낮은 것은 배전선로용 차단기의 부동작 또는 지연Trip되는 경우가 있어 변압기 용 보호계전기가 동작된 것으로 분석되었다.

#### 2.1.9 연도별 보호계전기 정동작율 추이

본 논문에서는 1981년 이후 보호계전기 동작상태를 분석하고 과거사례와 비교 분석하였다.



연도별 정동작율 추이

그림2. 연도별 정동작율 추이

송변전설비 보호계전기의 정동작율은 「그림2 연도별 보호계전기 정동작율 추이」에 나타나 있듯이 1981년부터 1989년도 까지 80%에서 90%사이를 불안정적으로 움직였지만 꾸준히 정동작율에 대한 저점을 계속 높여 나갔으며, 이후 90년부터 93년까지 보호계전기 정동작율 이 급격하게 상승되었다. 이는 90년 초부터 송전선로용 디지털 보호계전기가 도입 확대 사용하기 시작한 시점과 일치하며 꾸준히尖端 디지털 보호계전기에 대한 운영 기술 향상 및 보호계전기의 성능개선 추진등이 이루어 졌기 때문으로 분석되었다. 94년 이후 보호계전기 정동작율은 94%에서 ~ 95%로 상승 변화가 미미하지만 지속적으로 증가 추세를 보이고 있다. 이는 송전선로용 보호계전기가 대부분(72%) 디지털 보호계전기로 대체 되어 송전선로 보호계전기의 디지털화에 따른 효과가 차지하는 비중이 작아진 것으로 풀이된다.

#### 2.1.10 고장제거시간

'01년 실제 발생한 총 고장건수 332건중 고장분석이 가능한(고장data 확보: F/R, 내부저장기능) 254건에 대하여 통계 분석한 결과 218건(85.83%)는 5Hz이내, 20건(7.88%)는 5~6Hz이내, 12건은(4.71%)는 6~10Hz이내, 그외 4건(1.57%)는 10Hz이상 지속된 것으로 분석되었다. 여기서 고장지속시간은 고장발생부터 차단기가 동작하여 고장이 차단된 시점까지의 시간이며, 통상 차단기 TRIP에 필요한 시간은 2~3Hz 내외임을 고려할때 대략 고장의 93.71%는 고장발생 후 2~4Hz이내에 응동하여 TRIP지령을 보낸 것으로 분석되었다. 10Hz이상 지속된 4건의 고장은 차단기 불량(1건), 보호계전기 특성불량에 따른 지연 동작(2건), 한시요소 동작(Zone 2) 1건 등으로 계전기 및 차단기의 비정상적 상태에 기인한 것으로 고장모의 및 전력계통시스템 설계시 고장지속시간을 10Hz이상으로 심각하게 고려하지 않아도 될 사항으로 통계 분석되었다.

#### 2.1.11 보호계전기 동작요소별 분석

본 분석에서는 실제 고장제거시간여부와 관계없이(보호계전기 요소는 순시요소가 동작하였지만 고장기록이 없어 실제 고장제거시간 확인 불가)보호계전기 동작건수가 가장많은 송전선로 보호계전기 동작요소별 동작상태를 분석하였다. 송전선로용 보호계전기 총동작 건수(854건)의 99.83%(853건)이 고속도(1~3Hz)로 응동(C/R, ZONE1, 87(순시), 67(순시))한 것으로 나타났다. 한시 계전기 동작건수Zone2 1건이었다. 보호계전기 특성불량에 의한 고장제거시간 지연(10Hz)건은 총 2건으로 2건 모두 순시요소의 지연 Pick-up으로 동작요소는 Zone1으로 분석되었다. 고장발생시 보호계전기의 순시 응동에 대한 신뢰도는 통계분석에 알수 있듯이 매우 신뢰할 만 수준으로 파악되었다.

#### 2.1.12 송전선로 재폐로 계전기 동작 분석

2001년도의 송전선로 재폐로계전기 동작상태 통계 분

속을 보면 성공률 88.86%, 실패 11.31%, 재폐로계전기 부동작 2.83%로 집계 되었다 차단기 공기압지하 등의 이유로 부동작한 경우를 제외하면 대부분의 고장이 낙뢰, 수목접촉 등 순간고장이며, 보호 계전기가 순시로 고장을 제거하고 재폐로 시도를 했음을 알 수 있다. 전력계통의 안정적인운을 위해 재폐로계전기는 매우 유용하다고 할 수 있다. 재폐로 계전기가 정상적으로 동작하기 위해서는 보호계전기가 순시동작으로 고장을 제거하는 것이 우선 이루어 져야 하므로 전력계통의 운영에 있어서 보호계전기의 신뢰도는 매우 중요하다고 할 수 있다.

### 2.1.13 제작사별 보호계전기 점유율 및 정동작율

2001년 1월 현재 운전중인 154kV 이상 송전선로 보호계전기는 Toshiba 38.25%, Mitsubishi 36.35%, G.E 11.20%, ABB 9.23% Xelpower 4.4% 기타 (GEC, FUSI, 경보(주) 등 OCR류) 0.57% 순이며 Toshiba 와 Mitsubishi가 대략 75%를 차지하고 있다. 최근의 보호계전기는 통신 및 컴퓨터분야 등 여러 첨단 기술이 종합적으로 집적된 고도의 전문분야 발전하고 있으며, 국내에서도 최근 국산제품이 계통에 설치되어 운영되어 지고 있다. 제작사별 보호계전기 정동작율은 Toshiba 97.18%, Mitsubishi 99.69%, G.E 100%, ABB 91.55% Xelpower 94.74% 순으로 분석되었다. ABB계 보호계전기는 TYPE L-DAR계전기의 노후화(MODULE불량)으로 정동작율이 '00년(97.4%) 대비 하락 한 것으로 나타났다.

### 2.1.14 월별 보호계전기 동작분석

2001년도 보호계전기 동작건수를 월별 보호계전기 동작 점유율과 월별 실고장발생 빈도율과 비교하면 1월(15.33%/17.47%), 2월(2.39%/2.41%), 3월(4.35%/4.82%), 4월(3.37%/3.01%), 5월(1.41%/1.81%), 6월(5.54%/6.63%), 7월(38.26%/37.65%), 8월(15.15%/15.36%), 9월(1.52%/1.81%), 10월(2.39%/2.41%), 11월(1.30%/1.20%), 12월(4.89%/5.42%)로 통계 분석되어 「2.6 월별 고장발생 빈도 및 분석」과 에서 보여주듯이 실 고장발생 빈도율과 당연하게 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 고장의 원인이 일기와 매우 밀접한 관계가 있으므로 일기가 좋지 않은 시기(7월-8월) 전에 보호계전기의 정기 점검 및 각종 시험 등을 마무리 하는것도 보호계전기의 정동작율 향상 및 계통운영에 많은 도움을 줄수 있을 것으로 분석되었다.

### 2.1.15 시간대별 보호계전기 동작분석

2001년도 보호계전기 동작건수를 시간대별 보호계전기 동작 점유율과 실고장발생 빈도율과 비교하면 0시~04시(6.63%/7.53%), 04시~08시(15.98%/14.76%), 08시~12:00 (23.91%/23.80%), 12:00~16:00 (27.83%/27.71%), 16:00~20:00(20.32%/21.08%), 20:00~24:00(5.33%/5.12%)로 분석되었다. 특이한 것은 보호계전기 동작(철비고장) 점유율이 대부분 밤 시간대보다 활동을 시작하는 아침 08:00부터 저녁 20:00시의 12시간 사이에 약 72% 이상이 발생하는 것으로 통계분석(2000년 동시간대 발생률 62%)되어 심야보다는 주간계통운영 및 작업안전에 더 많은 주의가 필요한 것으로 분석되었다.

### 2.1.16 휴일과 평일 보호계전기 동작분석

2000년, 2001년도 2년간의 보호계전기 동작건수를 휴일과 평일 발생율로 비교 분석하면 '00년 휴일중 보호계전기 동작발생율은 23.19%, 2000년 365일 중 휴일이 차지하는 비율은 18.36%로 나타나 휴일이 차지하는 비율보다 동작발생율이 다소 높게 나타났지만 '01년에는 휴일중 보호계전기 동작발생율은 10.04% , 365

일 중 휴일이 차지하는 비율은 '00년과 같이 18.36%로 나타나 휴일이 차지하는 비율보다 동작발생율이 절반 가까이 적게 나타나 휴일과 평일간의 고장발생에 대한 특징은 찾을수가 없었다 즉 고장은 휴일과 평일에 관계없이 나타나는 것으로 분석되어 상시 고장에방 활동을 지속하여야 한다.

### 2.1.17 보호계전기 오동작에 대한 분석

2001년도 보호계전기 동작 총 920건 분석결과 38건의 오동작 발생한 것으로 통계분석되었다. 이 중 보호계전기 불량(MODULE, SPRING등 소자불량 등)이 13건으로 34.21%를 차지하고, 원인불명(CT특성불량 추정, 써어지 등에 의한 오동작 추정 등) 31.58%, 회로불량 (CT 오결선 등) 15.79%, 통신설비불량(PITR 내부소자손, 카드불량 등) 10.53%, 접촉불량(DC 혼촉, 단자대 불량) 7.89% 순으로 통계 분석되었다. 이 중 원인불명 6건은 지속적으로 원인규명을 추진하고 있지만 고장DATA(파형 등)의 부족 및 고장당시 상황현 불가(고장원인 자연해소 등)로 현재까지 아직 명확히 원인을 밝혀내지 못하고 있다. 특히 써어지에 의한 오동작 등은 고장당시의 써어지등을 측정할 수 없어 원인규명이 어려운 문제이기도 하다 향후 유사한 고장 재발을 사전에 방지하는 등 보호계전기의 신뢰도 향상을 위해서는 명확한 원인규명이 필수적이기에 지속적으로 유사고장을 추적 분석하여야 한다. 또한 과학적 고장분석을 위해 보호계전기 내부에 저장된 각종DATA의 활용을 위해 각종 관련시험시 고장DATA가 정상적으로 저장되고 분석가능한 상태인지에 대하여도 점검항목으로 추가하여야 할 것으로 분석되었으며, 고장시 발생한 Noise 및 Surge에 보호계전기, 특히 디지털 보호계전기가 충분히 견딜수 있도록 내환경(Electromagnetic Capibility) 시험 등을 강화하여 불필요한 고장파급을 방지 하여야 할 것으로 분석되었다..

## 3. 결 론

본 논문에서는 학술적인 측면보다 실제 계통 현장에서 발생한 복잡한 고장모형을 단순 세분화 시켜 통계 분석 자료로 사용 하였다. 새로운 통계자료를 얻고자 할 경우에는 지금보다 더욱 구체화 하면 원하고자 하는 통계 분석자료를 얻을 수 있다. 또한 세분화한 여러유형을 혼합하는 방법도 통계 Error를 줄이는데 많은 도움이 된다. 본문에서 분석된 9개의 유형별 계통의 고장현상을 혼합 분석하면 다음과 같다. 외부환경에 노출된 1회선(72.6%)의 154kV 송전선로(86.75%)에 고장발생률이 높으며, 그때의 고장은 주로 1선지락(59%) 고장이 다. 또한 거의 대부분(75%) Toshiba 또는 Mitsubishi 보호계전기에 의해 보통 6Hz이내(93%)에 고장이 제거되며 고장발생시기 및 원인은 2건중 1건은 낙뢰 산물 등 자연 재해(74.40%)가 대부분이고 발생월은 7,8월에 발생(53%)할 확률이 높다. 또한 심야보다 주간대 발생률(72%)이 높고, 재폐로가 정상적으로 동작(85.86%)하여 전력보호 시스템(선로용 보호계전기 정동작율 97.426%)에 특별히 문제가 없는한 계통은 안정적으로 운영되어 진다. 따라서 전력시스템에서 보호계전기의 중요도는 매우 높다 하겠다. 이 논문에서 통계 분석된 자료를 활용하여 전력기술분야의 학술 및 기술발전에 도움이 되길 기대한다.

### [참 고 문 헌]

- (1) " 1999 보호계전기 동작상태분석보고서" 한국전력공사 2000
- (2) " 2000년도 송변전 보호계전기 동작통계" 한국전력공사 2001.4
- (3) " 2001년도 보호계전기 동작상태분석보고서" 한국전력공사 2002.4