

긴급보호제어시스템(SPS)의 경제적 위험 평가 방법

‘한중교·박종영·박종근·안병진·조범섭·장병태
 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부, “전력거래소, “전력연구원

Risk Assessment for Special Protection Systems(SPS)

‘Choong-Kyo Han·Jong-Young Park·Jong-Keun Park·Byeong-Jin Ahn·Beom-Seop Jo·Byung-Tae Jang
 Seoul National Univ School of Electrical Engineering, “Korea Power Exchange, “Korea Electric Power Reserch Institute

Abstract - 전력산업의 경쟁도입 환경으로 인한 송전시스템에 대한 증가된 수요를 보여주고 있다. NERC의 1997-2000 신뢰도 평가 보고서에 의하면 과거 10년동안 대부분의 송전시스템 추가는 지역적 보강을 위해 이루어졌다. 전 계통의 시스템 능력을 강화시키는 큰 송전시스템의 증설은 거의 이루어지지 않았다. SPS는 비정상적 계통 상황을 검출하고 미리 계획된 동작을 수행함으로써 비정상적 상황을 회피하여 정상적 계통을 유지하게 한다. SPS는 계통의 송전능력을 증가시키는데 자주 이용된다. 새로운 송전설비 증설의 대안으로 비용면에서 값싼 SPS가 활용되어지는 것이다. SPS가 정확하게 동작한다면 상정사고에 대한 시스템 능력을 매우 향상된다. 그러나 미리 정의된 상황을 검출하는데 실패하거나 미리 계획된 교정동작을 수행하는데 실패한다면 매우 심각한 결과를 초래한다. IEEE-CIGRE 설문조사에서 보여주듯이 SPS 동작 실패는 비용면에서 매우 높은편으로 응답되었다. 따라서 단순 비용 평가를 통해 SPS를 도입을 결정할 수 없다. 경제적 위험 평가를 통해 SPS가 있을때와 없을때의 위험을 평가하여 의사결정에 반영하여야 한다. 본 논문에서는 SPS의 위험을 평가하는 절차를 보여주고 산업에서의 SPS 경험들을 소개하도록 한다.

1. 서 론

SPS는 계통 운영자에게 빠른 교정동작을 가능하게 함으로써 송전능력을 증가시킨다. 새로운 송전설비를 증설하는 것과 비교할 때 비용을 절약할 수 있다. 반면 SPS는 계통 신뢰도에 있어 위험을 증가시키게 된다. 즉 미리 정의된 상황을 검출하는데 실패하거나 미리 계획된 교정동작을 수행하는데 실패한다면 매우 심각한 결과를 초래한다. 먼저 SPS 설치비용을 살펴보면 규모와 범위에 따라 다양하다. 본 논문에서는 SPS 설치비용을 추정하는데 도움이 되는 SPS와 관련된 기업 경험을 설문 조사한 IEEE/CIGRE 보고서를 소개한다.

SPS는 비싼 송전설비 추가에 비해 비용면에서 매력적인 대안이 되므로 이러한 경향은 계속될 것이다. 따라서 SPS의 경제적 위험을 평가하는 기법을 개발하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 SPS 오동작/부동작 사례를 제시하여 필요성을 강조하고 일반적으로 수행되어지는 SPS의 경제적 위험 평가 방법을 제시하였다. 단순 비용 평가를 통해 SPS를 도입을 결정할 수 없고 경제적 위험 평가를 통해 SPS가 있을때와 없을때의 위험을 평가하여 의사결정에 반영하여야 한다. 마지막으로 GRS(발전기 탈락 계획)에 대한 위험을 평가하는 예시를 보여준다.

2. 본 론

2.1 SPS와 관련된 기업 경험(IEEE/CIGRE 보고서)

IEEE-CIGRE 보고서(94)는 신뢰도에 관련된 질문들을 SPS 설계자와 운영자에 질문하여 SPS와 관련된 기업 경험을 설문 조사하였다. 설문에 대한 응답은 총 111개 SPS에 대한 17개국 49개 전력회사에 의해 이루어졌다. 대표적인 설문조사를 나타내면 그림1-그림7과 같다.

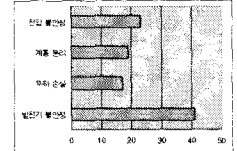
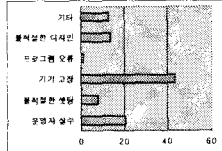


그림 1 SPS의 부동작의 원인

그림 2 SPS의 부동작의 영향

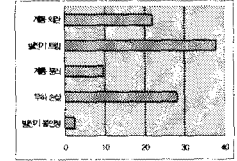
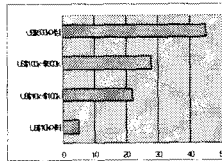


그림 3 SPS 부동작에 대한 비용 추정(좌)

그림 4 SPS의 불필요한 동작에 의한 영향(우)

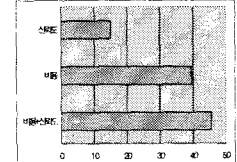
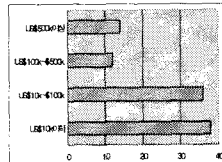


그림 5 SPS의 불필요한 동작에 대한 비용 추정(좌)

그림 6 SPS 선택시 고려할 요소들(우)

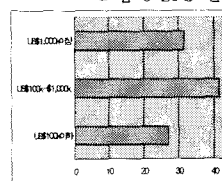


그림 7 SPS의 설계 및 설치 비용

2.2 SPS 오동작/부동작 사례

SPS NERC 계통사고 1986-1995에서 보고된 몇 개의 사례를 서술하도록 한다. 논리 디자인의 오류나 소프트웨어 결함, 하드웨어 고장, 부적절한 셋팅등을 그 원인으로 볼 수 있다.

- 1) WSCC-NE/SE 계통분리계획, 1988년 4월
 계획 : 계통 분리
 원인 : 디자인 오류(통신선 잡음으로 인한 오동작)
 결과 : 1,902MW 발전력 상실과 253MW 부하 정전
- 2) NPCC - Hydro-Quebec, 1988년 4월
 계획 : 부하 단전
 원인 : 하드웨어 고장
 결과 : 전 계통 정전
- 3) NPCC - Hydro-Quebec, 1988년 11월
 계획 : 부하 단전
 원인 : 하드웨어 고장
 결과 : 3,950MW 부하 정전
- 4) British Columbia H/T 분리, 1990년 1월
 계획 : 송전선로 제어 개폐
 원인 : 아밍 실패
 결과 : 230kV Cranbrook-Nelway 선로가 트립되고 B/T 계통의 연계선로 동쪽부분이 계통분리
- 5) Garrison-Taft 500kV 2회선 선로사고, 1990년 1월
 계획 : 무효전력 보상(2개의 500kV 리액터 트립)
 원인 : 논리 디자인의 오류
 결과 : 119MW 발전력 상실과 25MW 부하 정전
- 6) SE Idaho/SW Wyoming 사고, 1991년 9월
 계획 : 발전력 차단
 원인 : 하드웨어 고장
 결과 : 345kV 선로의 과부하로 인한 상실
- 7) Pacific AC Intertie 분리, 1991년 11월
 계획 : 계통 분리
 원인 : 소프트웨어 결함(PG&E 소프트웨어 제어기가 교정동작을 수행하는데 시지연)
 결과 : 계통 분리 실패
- 8) Minnesota-Wisconsin연결 69kV 선로 과부하, 1992년 10월
 계획 : 송전선로 제어 개폐
 원인 : 부적절한 셋팅
 결과 : 두개의 69kV 선로가 열에 의한 지락사고

2.3. SPS 경제적 위험 평가 방법

SPS의 경제적 위험 계산은 확률과 영향을 양적으로 고려하면서 수행되어진다. 위험을 평가하는 일반적 절차는 그림 8과 같다.

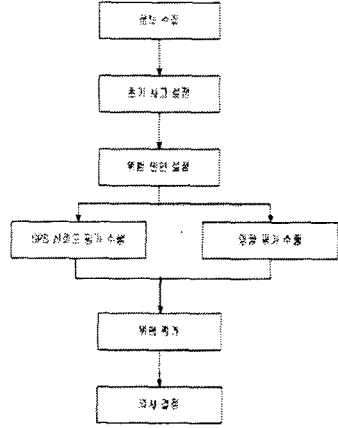


그림 8 SPS 경제적 위험 평가 절차

- 1) 정보 수집
 유지보수 및 테스트 절차뿐만 아니라 SPS의 전체적 물리적 지식, 운영 논리, 각부분의 기능, 위치, 성공 기

준, 소프트웨어 정보등이 SPS 신뢰 평가에 필요하다. 시스템 운영 상태에 관한 정보, 운영자 반응 절차, 운영자 신뢰도 또한 수집되어야 한다. 이런 과정은 SPS 위험 평가에 있어 매우 중요한 과정이다.

2) 초기 사고 설정

초기 사고는 보통 선로 사고, 발전기 트립, 부하 차단 등의 외란을 말한다. 초기 사고들의 집합은 설정될 필요가 있다. 주된 목적이 SPS가 있을때 시스템 위험과 SPS가 없을때 시스템 위험을 비교라면 SPS를 동작시키는 초기 사고들이 포함될 필요가 있다. 만일 SPS에 대한 전 시스템의 위험을 평가하는 것이 목적이라면 모든 시스템 외란 사고가 고려되어야 한다.

3) 위험 원인 설정

SPS는 큰 외란 후 비정상적이 결과를 회피하기 위해 디자인된다. SPS으로부터의 위험은 주로 다음과 같은 4개의 원인에 의하여 온다.

- 하드웨어 결함
- 디자인 논리 오류
- 소프트웨어 결함
- 운영자 실수

4) SPS 신뢰 평가 수행

SPS의 위험 평가에 중요한 미래의 SPS의 유용성을 알기 위해서는 SPS 신뢰도를 평가하는 방식이 하나 채택되어야 한다. SPS에 일반적인 다양한 특징들을 나타낼 수 있는 유연성 때문에 SPS 신뢰도 평가에는 Markov 모델링이 적합하다. 특히 Markov 모델링은 독립적이고 일반적인 실패, 부분/전체 복구, 유지보수와 진 단등을 통합할 수 있다. 또한 그것은 이러한 모든 특징이 시간의 함수로 모델링될 수 있다. 이것은 정적 상태 결과만을 보여주고 단지 짧은 복구 시간과 낮은 실패 빈도에 대해서만 정확한 확률 방법과 대조적이다. FMEA(Failure mode and effect analysis)는 Markov 모델링에서 실패 모드들은 설정하는 초기 단계에서 이용되어질 수 있다.

5) 영향 평가 수행

SPS 부동작의 결과는 경제적 손실면에서 평가될 필요가 있다. 즉, SPS 부동작과 관련된 전체 비용을 추정하여야 한다. 그 영향들은 기기 손상, 기기 고장과 부하 정전과 패널티등이 될 수 있다. 이러한 추정은 과거 역사적 사실 또는 설문조사, 전문가 의견등으로부터 이루어질 수 있다.

6) 위험 평가

SPS 신뢰도 정보를 포함하는 시스템 위험이 계산되어진다. SPS가 설치되지 않을 때의 시스템 위험이 비교를 위하여 계산되어야 한다.

7) 의사 결정

위험 계산 결과에 기반하여 시스템 운영자는 신뢰도를 증가하기 위한 SPS와 관련된 결정을 할 수 있다. 이러한 결정중의 하나는 SPS를 아밍하는 시점이다. 산업 현장에서는 SPS 아밍 포인트는 아밍시점과 관계없이 최악의 시나리오에 기반하여 이루어진다. 때때로 최악의 시나리오는 확률이 낮기 때문에 SPS가 있을 때 시스템 위험이 SPS가 없을 때 시스템 위험보다 클 수도 있다.

위험은 영향의 평균값이기 때문에 위험의 분산이 의사 결정에 영향을 미칠 것이다. 예를 들어보면 SPS가 있을 때 상황과 SPS가 없을 때 상황은 똑같은 위험을 가지나 서로 다른 분산을 가진다면 시스템 운영자는 더 낮은 분산을 갖는 상황 선택하여 SPS를 아밍할지를 결정할 것이다.

2.4. SPS 경제적 위험 평가 예시

SPS의 위험 평가 예시를 위해 GRS(발전기 탈락 계획)에 대한 위험을 평가하는 방법을 제시한다. 그림 9는 IEEE 신뢰도 테스트 시스템의 한 부분으로 SPS 논리를 보여주고 있다.

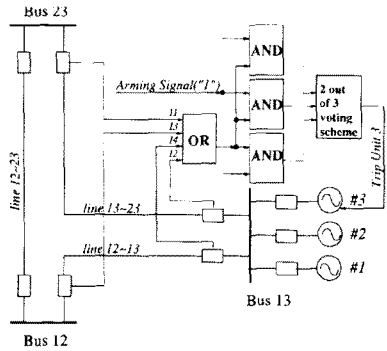


그림 9 GRS 논리회로 시스템

선로 12-13과 13-23은 중요 선로이다. SPS가 없을 경우 이 두 선로중 어느 하나가 사고가 나면 발전소 가동 중단의 상황이 발생할 수 있다. 이 발전소의 과도불안정을 개선하기 위하여 발전기 탈락 계획(GRS)이 도입되었다. GRS가 이 두 선로중 하나의 선로사고를 검출하면 즉시 나머지 2기의 발전기를 가동하게 하기 위하여 1기 발전기를 탈락시킨다. GRS의 논리는 단순하다. 중요선로(선로 12-13과 13-23)의 고장이 있으면 해당 선로의 차단기가 동작하고 어떤 차단기의 개폐신호도 OR게이트의 출력을 발생시킨다. OR 게이트의 신호는 AND게이트의 출력을 결정시킨다. 이 AND게이트의 출력들은 상위 레벨의 Voting시스템의 입력이 되고 이 시스템 신호에 의해 미리 선택된 발전기를 탈락시키게 된다. 여기서 차단기와 Voting시스템은 완전히 신뢰할 수 있다고 가정한다.

현재 산업 관행에서 GRS의 아밍 포인트는 아밍시간에 무관하게 최악의 시나리오 시뮬레이션에 근거하여 결정된다. 3상단락사고는 가장 심각한 사고이다. 그러나 발생빈도가 적으므로 위험정도가 2상 또는 단상 사고보다 작다. 따라서 3상단락사고만을 고려한 아밍 포인트는 모든 4가지 종류의 사고를 고려한 아밍 포인트와 다르다. 최적 아밍포인트를 결정할 기준은 위험의 최소화가 될 수 있다. 따라서 GRS가 있을 때와 없을 때의 발전력과 위험의 그래프를 통해 최적 아밍 포인트를 결정할 수 있다. 다른 말로 한다면 아밍된 GRS가 있을때의 위험이 아밍포인트 아래의 발전력에서는 아밍되지 않은 GRS가 있을 때의 위험보다 크다. 반대로 아밍포인트 위의 발전력에서는 아밍된 GRS의 위험은 아밍되지 않은 GRS보다 작다.

GRS가 있는 시스템에 대한 전체 위험을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Risk(K \cup T) &= \sum_{i=1}^4 Risk(E_i) \\
 &= \sum_{i=1}^2 Pr(K \cap T' \cap E_i) Im(K \cap T' \cap E_i) \\
 &+ \sum_{i=1}^3 Pr(T \cap E_i) Im(T \cap E_i) + Pr(E_4) Im(E_4)
 \end{aligned}$$

GRS가 없는 시스템에 대한 위험을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Risk(K) &= \sum_{i=1}^4 Risk(E_i) \\
 &= \sum_{i=1}^2 Pr(K \cap E_i) Im(K \cap E_i) + Pr(E_4) Im(E_4)
 \end{aligned}$$

여기서, $Risk()$, $Im()$, $Pr()$ 은 각각 사건에 대한 위험, 영향, 확률을 의미한다. E_i 는 초기 사건을 의미하고, T

는 GRS 트리핑 사건을 의미한다. K 는 과도불안정 사건으로 즉, 동기상실로 인한 어떤 발전기의 트립을 의미한다.

위의 두 식을 바탕으로 그림 10을 얻을 수 있다. 그림에서 보듯이 573MW의 발전력이 최적 아밍포인트임을 알 수 있다. 반면 최악의 시나리오(13번 모션의 3상단락 사고)에 의한 아밍포인트는 430MW였다. 만일 430MW 발전력 레벨에 GRS를 아밍하면 시스템 위험은 시간당 \$6.09만큼 커진다. 따라서 아밍포인트를 결정하는 관행적 최악의 시나리오 방법은 불필요하게 위험을 증가시킬 수 있다. 한편 600MW 발전력 레벨에 GRS를 아밍하면 시스템 위험은 시간당 \$1.90만큼 작아진다. 이러한 결과를 통해 GRS를 적용하고 있는 시스템의 가치를 판단할 수 있다.

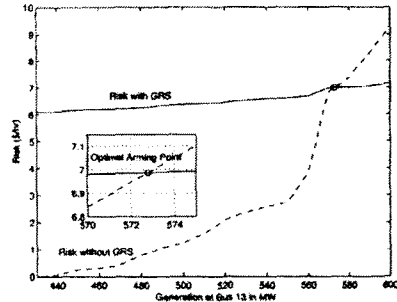


그림 10 최적 아밍포인트 결정

3. 결 론

지금까지 비정상적 계통 상황을 검출하고 미리 계획된 동작을 수행함으로써 비정상적 상황을 회피하여 정상적 계통을 유지하게 하는 SPS의 경제적 위험 평가 방법에 대해 살펴보았다.

새로운 송전설비 증설의 대안으로 비용면에서 값싼 SPS가 활용되어질 수 있으나 미리 정의된 상황을 검출하는데 실패하거나 미리 계획된 교정동작을 수행하는데 실패한다면 매우 심각한 결과를 초래한다. IEEE-CIGRE 설문조사에서 보여주듯이 SPS 동작 실패는 비용면에서 매우 높은편으로 응답되었다. 비록 SPS의 동작 실패는 확률적으로 보면 매우 낮으나 그 결과는 매우 심각하다.

또한 SPS는 과거 10년동안 급격히 늘어났다. SPS는 비싼 송전설비 추가에 비해 비용면에서 매력적인 대안이 되므로 이러한 경향은 계속될 것이다. 따라서 SPS의 경제적 위험을 평가하는 기법을 개발하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 SPS 오동작/부동작 사례를 제시하여 필요성을 강조하고 일반적으로 수행되어지는 SPS의 경제적 위험 평가 방법을 제시하였다. 또한 그 사용 예시로 GRS(발전기 탈락 계획)에 대한 위험 평가를 소개하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] James D. McCalley, Weihui Fu, "Reliability of Special Protection Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 4, November 1999.
- [2] Weihui Fu, Sanyi Zhao, James D. McCalley, Vijay Vittal, Nicholas Abi-Samra, "Risk Assessment for Special Protection Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No. 1, February 2002.
- [3] V. Vittal, J.D. McCalley, V. Van Acker, W. Fu, N. Abi-Samra, "Transient Instability Risk Assessment," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol 1, 18-22 July 1999.
- [4] IEEE/CIGRE Committee Report, "Industry Experience with Special Protection Schemes", IEEE Trans on Power Systems, Vol.11, No.3, Aug, 1996