

배전시스템 신뢰도 개요 및 동향

■ 문 종 필 / 기초전력연구원 선임연구원
 ■ 김 재 철 / 송실대학교 교수

1. 개 요

전력시스템 신뢰도는 크게 적정도(Adequacy)와 안전도(Security)로 나누어 생각할 수 있다. 적정도의 개념은 수용가의 수요를 공급할 수 있는 충분한 설비가 시스템에 있는지의 여부로 생각할 수 있다. 여기서 설비란 전력을 생산하기 위한 시스템, 전력을 수용가에 전달하기 위한 송전 및 배전시스템 등을 말한다. 따라서 적정도는 정적(Static)인 개념이다. 한편 안전도는 시스템 내에서 발생하는 외란(Disturbance)에 대응할 수 있는 능력으로 생각할 수 있다. 따라서 안전도는 어떠한 외란에 대한 주어진 시스템의 응답과 관련이 있게 되고 동적(Dynamic)인 개념으로 이해할 수 있다 [1]. 본고에서는 전력시스템 신뢰도에서 일반적으로 생각하는 적정도에 초점을 맞추어 설명하고자 한다.

전력시스템 신뢰도 평가는 일반적으로 시스템을 기능에 따라 분리하여 수행을 한다. 이러한 이유는 우선 전력시스템 자체가 수많은 발전설비와 복잡한 송전 및 배전시스템으로 구성되어 있기 때문에 전체를 평가하기에는 수많은 시간과 노력이 필요하기 때문이며, 또한 발전, 송전, 배전을 각각 나누어 평가를 하더라도 그 결과를 계통 계획과 같은 현실적인 문제에 충분히 반영할 수 있기 때문이다. 그림 1은 전력시스템을 기능에 따라 구분한 계층적 단계(hierarchical level, HL)이다. 그림에서 알 수 있듯이 HL1은 발전시스템, HL2는 '발

전+송전시스템', HL3는 '발전+송전+배전시스템'을 의미한다. 그러나 HL3는 결국 전체 전력시스템을 나타내기 때문에, HL3는 일반적으로 배전시스템만을 의미하는 용어로 사용한다.

본고에서는 신뢰도 평가를 위한 Markov 모델, 배전 신뢰도 지수(Index)를 살펴보고, 최근 배전신뢰도의 연구 및 응용분야인 시변(Time-varying)고장률 문제, 비용(Cost)/가치(Worth) 평가, 전력품질(Power quality), 자산관리(Asset management), RCM(Reliability-centered maintenance), 분산전원(Dispersed generation) 연결 문제 등에 대하여 알아보하고자 한다.

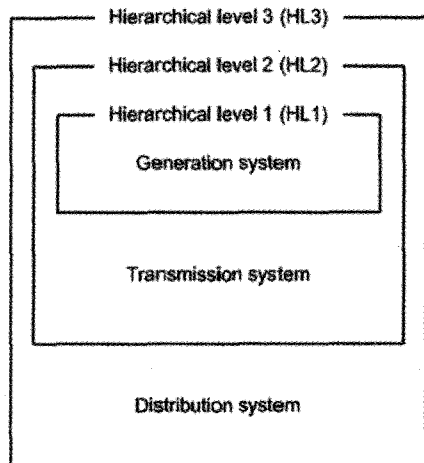


그림 1 전력시스템 신뢰도 계층레벨

2. 배전시스템 신뢰도 평가

배전시스템 신뢰도 평가는 과도상태의 경우가 아닌 정상상태인 경우를 말한다. 예를 들면, 만약 연간평균 정전빈도가 1[occ./year]이라고 하면, 이 값이 말하는 것은 시스템이 오랜 기간 동안 운영되었을 때 정전빈도가 평균적으로 연간 1회라는 것이지, 반드시 1년에 1회의 정전이 발생하는 것을 의미하는 것은 아니다. 즉, 올해는 3회가 발생할 수도 있고, 내년에는 정전이 발생하지 않을 수도 있다. 이러한 배전신뢰도 평가는 기본적으로 Markov 모델에 기초한다. 여기서는 우선 Markov 모델에 대하여 알아본다. 그림 2는 수리가능한 한 개의 기기에 대한 모델을 보여준다.

여기서 '1'은 정상상태, '0'은 고장상태, λ [occ./year]는 고장률, μ [occ./year]는 수리율을 나타낸다. 이 모델에서 주어진 고장률과 수리율을 이용하여 어떤 정해진 기간 동안 기기가 상태 1에 있는 기간과 상태 0에 있는 기간을 계산하고, 각각의 값을 총 기간으로 나누게 되면, 기기가 각 상태에 있을 확률을 구할 수 있게 된다(P_1, P_0). 이 확률값에 정해진 기간을 곱하게 되면 그 값이 가용도(Availability, A) [hour/year]와 불가용도(Unavailability, U) [hour/year]가 된다. 배전계통에서는 각 기기가 수용가에 미치는 Unavailability를 합산하여 각 수용가에 대한 Unavailability를 구하게 되고, 이 값은 곧 수용가가 연간 경험하는 정전시간을 나타내게 되므로 기기의 Unavailability는 매우 중요한 지수가 된다.

여기서 한 가지 짚고 넘어가야 할 점은, 앞서 언급하였듯이 신뢰도는 정상상태인 경우를 의미하고 또한 Markov 이론상 천이율(Transition rate)은 일정한 값을 가져야 하므로 (Stationary), 위 모델에서 λ 와 μ 는 항상 일정한 값을 가져야 한다. 따라서 배전시스템 신뢰도 평가에서 이 두 값은 지수분포함수(Exponential distribution function)를 갖는 것으로 가정한다. 지수분포에 대한 설명은 여기서는 생략한다.

이러한 λ, μ, U 를 이용하여 배전시스템에 대한 신뢰도 지수를 구하게 된다. 배

전시스템 신뢰도 지수는 크게 영구정전지수(Sustained interruption indices), 부하관련지수(Load based indices), 순간정전지수(Momentary interruption indices)로 나눌 수 있다.

영구정전지수는 시스템 평균정전빈도(System average interruption frequency index, SAIFI), 시스템평균정전지속시간(System average interruption duration index, SAIDI), 수용가평균정전빈도(Customer average interruption frequency index, CAIFI), 수용가평균정전시간(Customer average interruption duration index, CAIDI), 수용가총평균정전시간(Customer total average interruption duration index, CTAIDI), 평균서비스가용도(Average service availability index, ASAI) 등이 있다. 부하관련지수는 평균시스템정전빈도(Average system interruption frequency index, ASIFI), 평균시스템정전시간(Average system interruption duration index, ASIDI)가 있다. 마지막으로 순간정전지수는 평균순간정전빈도(Momentary average interruption frequency index, MAIFI) 등이 있다 [2]. 각각의 지수에 대한 자세한

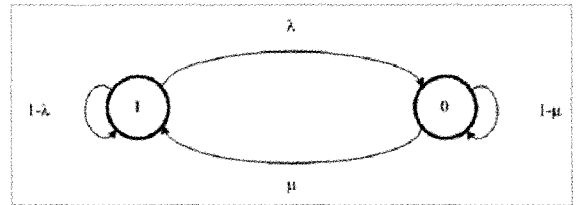


그림 2 한 기기에 대한 Up/Down 모델

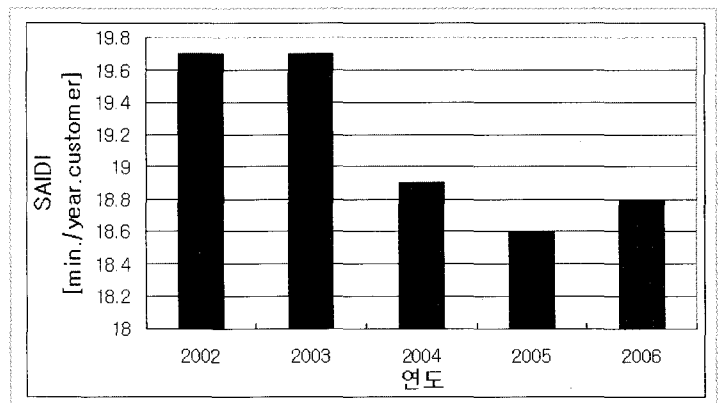


표 3 국내 SAIDI 추이

한 설명은 참고문헌을 참고하길 바라며, 여기서는 자세한 설명은 언급하지 않는다. 현재 국내에서는 한국전력공사가 SAIFI와 SAIDI를 '호당정전 횟수' 및 '호당정전시간'으로 매년 발표하고 있으며, 그림 3은 SAIDI 추이를 보여준다.

SAIDI는 2006년 기준으로 수용가당 평균 18.8분의 정전시간을 기록하고 있으며, 이 값은 일본보다는 높지만 다른 선진국보다 훨씬 작은 값으로 최고의 전력신뢰도를 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 SAIFI는 2005년 기준으로 0.45[loc./year/customer]를 기록하고 있다. 그러나 SAIFI는 정전이 5분이상 지속되는 경우에는 카운트하고 있으며, 만약 정전이 5분 이하일 경우에는 횟수로 포함하지 않는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하고 최근 순간전압품질 문제가 대두되면서, 2007년부터는 CAIDI와 MAIFI를 도입하여 수용가 중심의 지수 및 순간정전지수의 관리를 시작하고 있다.

3. 최근 동향

최근 배전시스템 관련 연구는 단순히 앞에서 언급한 지수만을 구하는데 그치지 않고, 다양한 방향으로 확대하여 발전하고 있다. 여기서는 주요 이슈에 대하여 알아본다.

시변(Time-varying) 고장률

앞에서 언급한 바와 같이 기존의 신뢰도 평가는 지수함수분포를 이용한 평균적인 개념의 시불변(Constant) 고장률을 사용하여왔다. 이러한 평균고장률을 사용한다는 것은 기기의 열화를 무시하고 기기가 욕조(bath-tub) 곡선의 중간단계(Normal operating stage)에 있고 또한 기기에 대하여 주기적인 유지보수를 행하고 있다고 가정하여야 한다. 이러한 가정은 기본적으로 기기가 열화되기 전까지는 타당하다. 그러나 기기가 Normal 단계에 있다고 하더라도 실질적으로 열화는 진행되고 있으며, 기기에 대한 유지보수가 고장률을 항상 일정하게 유지하는지에 대한 연구는 부족

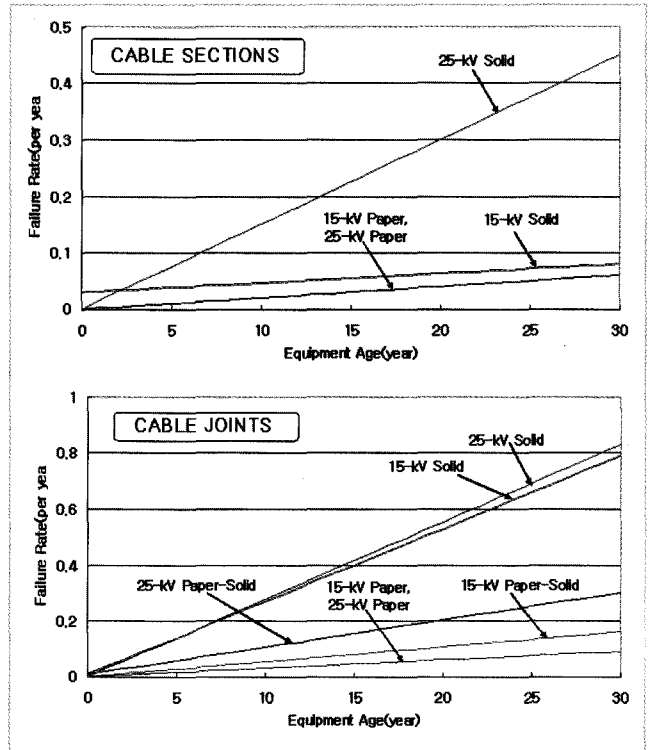


그림 4 시변고장률 예 (미국 북동부 전력회사)

한 실정이다. 따라서 조금 더 정확히 분석한다면 고장률은 시간에 따라 점점 증가한다고 볼 수 있다. 더구나 전력산업구조개편이 진행된 선진 국가에서는 기기의 노령화 및 유지보수 비용의 감소에 대한 관심의 고조로 인하여 보다 정확한 고장률 추출에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 그림 4는 미국 북동부 전력회사에서 추출한 시변고장률 예를 보여준다. 국내에서도 전력연구원 및 대학 등에서 배전설비에 대하여 시변고장률을 추출하는 연구가 진행되었다.

Cost/Worth

SAIFI, SAIDI와 같은 전력신뢰도 지수는 그 나라의 전력신뢰도를 나타내는 등 그 자체만으로도 충분히 큰 의미가 있지만, 신뢰도는 비용(Cost)과는 떨어져서 생각할 수 없다. 즉, 정전이 몇 번이나 발생하고 연간 몇 분이나 정전이 지속되는지에 대한 지수는 결국 비용으로 환산되어야 더 큰 의미를 가질 수 있다. 따라서 신

되도 지수는 결국 비용으로 환산되고 가치(Worth) 평가도 연구하고 있는 추세이다.

신뢰도에서 비용이란 결국 정전이 발생하였을 때 수용가가 입는 피해 정도를 나타내는 정전비용(Customer interruption cost)이 된다. 이 비용들은 EENS(Expected Energy Not Supply), ECOST(Expected interruption cost), IEAR(Interrupted Energy Assessment Rate) 등으로 환산되어 신뢰도가 시스템 전반에 미치는 비용으로 환산되는 연구가 활발히 이루어지고 있다 [4].

전력품질 (Power quality)

신뢰도가 1분 또는 5분 이상의 비교적 긴 시간의 정전에 관심이 있다면, 전력품질 문제는 이보다 작은 시간에 관심이 있다. 즉 전력품질에서 전압품질 문제로는 순간정전(Momentary interruption), Sag, Swell 등이 있고, 주파수 품질문제로는 고조파(Harmonics) 등이 있다. 현재 전력품질과 배전신뢰도의 연구는 그 경계가 애매모호한 실정이다. 즉, 전력전자 기기의 사용으로 인하여 전력품질에 많은 악영향을 주고 있으며, 수용가에서는 보다 민감한 기기를 많이 사용하기 때문에 과거와는 달리 순간정전뿐만 아니라 전력품질 문제에도 수용가는 민감하게 반응하게 되었다. 즉, 아주 짧은 시간의 특성을 갖는 전력품질 문제로 인하여 수용가는 장시간의 정전을 경험하게 되고, 결국 이는 수용가의 피해로 이어지게 된다. 신뢰도 관점에서는 이러한 문제 또한 수용가에 정전을 발생시키고 그에 따라 정전비용이 발생하기 때문에 현재 신뢰도는 전력품질 문제를 포함하게 그 연구범위가 점차 커지고 있는 실정이다 [5].

자산관리(Asset management)

자산관리란 용어는 기본적으로 경제 분야에서 나온 것으로 주식, 공채, 현금, 기타 등등의 자산을 효율적으로 관리하기 위한 것이다. 그림 5는 자산소유자(Asset owner), 자산관리자(Asset manager), 자산서비스공급자(Asset service provider) 측면을 고려한 자산관리의 개념도이다 [6].

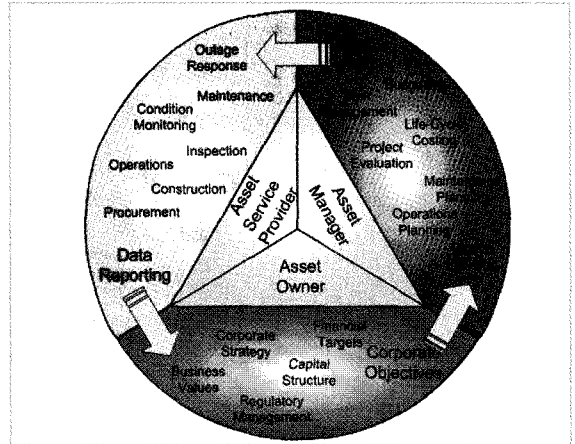


그림 5 기능에 따른 자산관리

전력회사의 자산관리는 기본적인 전력설비의 관리뿐만 아니라 성능(Performance), 위험(risk), 비용(cost)의 균형을 맞추기 위한 최적 전략의 의미로 이해할 수 있다 [6]. 즉, 전력자산을 운영하기 위하여 비용을 적절히 분배하고, 분배된 비용의 우선순위를 결정하고, 비용을 최소화시키면서 위험을 적정 수준이하로 관리하는 것이다. 이러한 자산관리를 위해서는 신뢰도 평가는 필수적이다. 따라서 각 설비의 경년열화에 따른 위험도를 분석하고(고장률), 그 위험도에 따른 계통의 영향을 평가하고(신뢰도, Cost/Worth), 원하는 신뢰도를 유지하기 위한 비용(Cost)을 산출하여 어느 한쪽으로 치우치지 않는 최적의 방안을 찾아야 한다. 여기서 알 수 있듯이 결국 배전시스템의 위험도는 신뢰도로 평가될 수밖에 없다. 외국의 경우 오리온 전력회사(Orion Utility), 북동 전력회사(Northeast Utility) 등에서 활발히 연구하고 적용중이며, KEMA에서도 연구가 진행 중이다. 국내의 경우도 전력연구원에서 배전자산관리에 대한 연구가 진행되고 있다.

신뢰성 기반 진단 (Reliability-Centered Maintenance, RCM)

현재까지 전력설비 진단은 TBM(Time-based Maintenance), CBM(Condition-based Maintenance)이 주류를 이루어 왔다. 그러나 구조개편이 진행되는 상황에서 기업의 논리에 따라 투자를 최소화하면서 이익을 최대화하려는 노력을 보이고 있다. 전력설비 진단

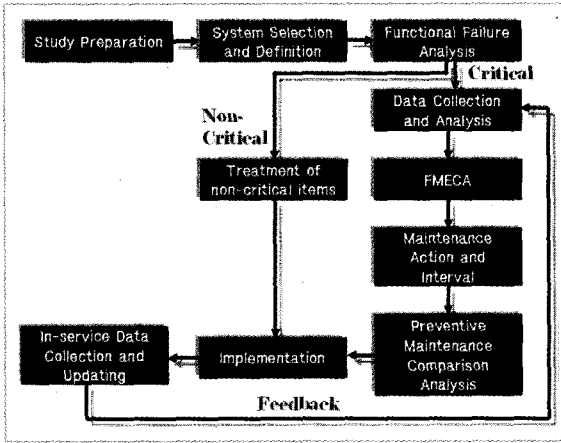


그림 6 RCM Procedure

분야에 있어서 이러한 최대의 B/C를 제공해 주는 기법이 RCM이다.

RCM은 설비 유지, 보수에 있어서 신뢰도에 기반을 두고 결정하는 방법이다. 즉, 설비를 유지, 보수함에 있어서 설비의 과거 이력과 고장유형 및 영향분석인 FMEA(Failure Modes and Effects Analysis)를 통하여, 효율과 경제성을 모두 만족하도록, 설비의 목표 신뢰도를 유지하기 위한 최적의 유지보수 기법을 제시한다. 그림 6은 RCM procedure를 나타낸다.

최근 외국에서는 신뢰도 전문가들을 중심으로 RCM 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 국내에서도 연구소 및 기업에서 변전설비에 대한 RCM 연구가 진행중이다 [7].

분산전원(DG) 연계

배전시스템 신뢰도에 대한 또 하나의 이슈는 최근 활발히 연구되고 있는 분산전원과의 연계 문제이다. 분산전원은 에너지 측면에서도 전력시스템에 많은 도움이 되지만, 신뢰도 측면에도 다방면으로 검토되어야 한다. 신뢰도가 기본적으로 정전의 횟수와 정전시간이라고 규정하면, 계통에서 사고 발생시, 계통과 분산전원을 분리할 경우 분산전원이 설치된 수용가 혹은 분

산전원과 가까이 있는 수용가는 정전이 발생하지 않을 수도 있다. 또한 계통과 분산전원의 보호협조가 잘 이루어지지 않거나 분산전원 자체의 고장으로 기존 계통에 영향을 줄 경우는 수용가는 추가적인 정전을 경험하게 될 수도 있다. 이러한 전체적인 문제는 신뢰도 평가를 위하여 분산전원을 어떻게 모델링하느냐에 달려있으며 관련 데이터의 축적이 필수적이다. 분산전원의 신뢰도 평가 모델은 국내에서도 개발된 사례가 있으며 외국에서도 많은 연구가 진행되고 있다 [8-10].

4. 결 언

본고에서는 전력시스템 신뢰도의 개념과 배전시스템 신뢰도를 소개하고, 최근 신뢰도의 응용 연구 분야에 대하여 소개하였다. 현대 사회에서 수용가의 전력 신뢰도에 대한 관심은 점점 높아지고 있으며 국내 전력회사도 이에 대응하여 신뢰도 분야에 보다 많은 관심을 보이고 있으며 많은 신뢰도 지수를 관리하려는 노력을 보이고 있다. 특히 전력산업구조개편에 따라 투자대비 이득을 최대화 하려는 기업의 입장과 고신뢰도의 전력을 요구하는 수용가 사이에서 신뢰도 문제는 더욱더 심해질 것으로 판단된다.

향후 신뢰도 분야의 발전을 위하여 전력회사와 연구소, 학계에서는 국내 배전시스템 신뢰도 지수를 보다 정확하고 체계적으로 관리할 수 있도록 상호 협력해야 하고 또한 관련 응용 분야에 대한 보다 많은 연구를 수행하고 다양한 연구결과를 도출하여 외국보다 앞서나갈 수 있도록 노력해야 할 것으로 사료된다.

검사의 글

본 기획시리즈는 산업자원부 지정 '전력신뢰도/품질 연구센터'에서의 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다. 본 센터에는 경상대, 서울대, 숭실대, 전북대, 한양대의 교수들과 대학원생들이 연구원으로 참여하고 있습니다.

참 고 문 헌

- [1] Roy Billinton and Ronald N. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems (Second Edition), Plenum Press, 1996
- [2] IEEE Std. 1366, IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, 2003
- [3] 신뢰성 및 경제성을 고려한 배전계통 최적투자계획 수립모델 및 시스템 개발, 한전 전력연구원 2차년도 중간보고서, 2007년 2월.
- [4] Roy Billinton and Peng Wang, "Distribution System Reliability Cost/Worth Analysis Using Analytical and Sequential Simulation Techniques," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 4, Nov. 1998
- [5] A. Coelho, C.L.C. de Castro, M.G. Da Silva and A.B. Rodrigues, "Inclusion of voltage drop and feeder loading constraints in the evaluation of reliability indices for radial distribution networks," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 153, No. 6, Nov. 2006
- [6] Richard E. Brown and Bruce G. Humphrey, "Asset Management for Transmission and Distribution," IEEE Power & Energy Magazine, May/June 2005
- [7] IEEE/PES Task Force on Impact of Maintenance Strategy on Reliability, "Impact of maintenance strategy on reliability," Final Report, July 1999
- [8] Aleksandar Pregelj, Miroslav Begovic, and Ajeet Rohatgi, "Recloser Allocation for Improved Reliability of DG-Enhanced Distribution Networks," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 3, Aug. 2006
- [9] Rechar E. Brown, "Modeling the Reliability Impact of Distributed Generation," IEEE PES Summer Meeting, Vol. 1, 2002
- [10] In-Su Bae, Jon-O Kim, Jae-Chul Kim, C. Singh, "Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Hourly Reliability Worth," IEEE Transactions on Power Systems Vol. 19, No. 1, Feb. 2004