

Markov Model을 이용한 배전계통 기기의 유지보수 최적주기 결정

박근표* 문종필** 윤용태* 이상성** 김재철***

*서울대학교 전기컴퓨터공학부 **기초전력연구원 ***승실대학교 전기공학과

Determination of optimal maintenance interval at power distribution system equipment using a Markov Model

Geun-Pyo Park, Jong-Fil Moon, Yong-Tae Yoon, Sang-Seung Lee, Jae-Chul Kim
*Seoul National University, **KESRI, ***Soongsil University

Abstract - 전력 산업구조개편으로 인하여 전력회사의 민영화가 진행됨에 따라 전력회사에서는 한정된 예산으로 배전계통을 운영함으로써 유지보수를 위한 충분한 여유가 없어지게 될 것이다. 이러한 환경에서 한정된 비용으로 계통의 신뢰도를 일정 수준 이상으로 유지해야만 하는 문제에 직면하게 되며, 이는 매우 어려운 일이다. 이를 위해서는 최소의 비용으로 최대의 유지보수 효과를 낼 수 있는 방법을 개발해야 하며, 최적의 유지보수 주기를 찾는 것이 중요한 문제라 할 수 있다. 본 논문에서는 이런 문제를 해결하기 위해, 유지보수 기기 선정 및 유지보수 주기를 결정하는데 있어 검증된 기법인 Reliability Centered Maintenance (RCM) 기법을 이용하였다. 배전계통 기기의 유지보수에 있어서 Four-state Markov 모델을 이용하여 기기의 유지보수에 드는 비용과 기기의 고장에 의한 정전비용 사이의 trade-off를 고려하여 총 비용이 최소가 되는 최적의 유지보수 주기를 찾고자 한다. 이를 위하여 기존의 모델에서 평균고장률(mean failure rate)을 사용한 것과는 달리 시변 고장률(time-varying failure rate)을 적용하였으며, 또한 유지보수에 따른 고장률의 감소도 고려함으로써 최적의 유지보수 주기를 결정할 수 있었다.

1. 서 론

전력 산업구조개편으로 인하여 전력 회사의 민영화가 진행됨에 따라 전력 회사들은 한정된 예산으로 배전계통을 운영하게 될 것이다. 배전계통에 있어서 유지보수는 많은 비용을 필요로 한다. 따라서 계통의 신뢰도를 일정 수준 이상으로 유지하면서 최소의 비용으로 유지보수를 할 수 있는 최적의 유지보수 주기를 찾는 것은 중요하다. 이에 기기 별로 축적된 데이터베이스를 바탕으로 기기의 수명을 파악하고 최적 유지보수 주기를 결정하는 RCM 기법은 경제성을 고려한 현실 적용에 그 의미가 있다. 즉, RCM의 주요 목적은 유지보수 비용을 줄이는 것이다. 현재까지의 예방진단 방법인 PM(Preventive Maintenance)기법은, TBM(Time-based Maintenance)과 CBM(Condition-based Maintenance)으로서, TBM은 설비의 수명이나 상태에 관계없이 일정 시간 간격으로 보수를 하는 방법으로서 배전용변압기의 간이수리, 중수리 등이 이에 해당된다. CBM은 설비 상태에 기반을 둔 진단기법으로써, 변압기의 유증가스 분석, 부분방전 분석 등이 있다[1].

RCM은 현재까지의 예방진단기법을 모두 통합하여 최적의 유지보수 기간 및 최적의 유지보수 기법을 제시하는 방법이다. 최적의 유지보수 주기를 찾기 위해서 몇 가지 다른 형태의 모델들이 개발되어왔다[5]-[8].

RCM 기법 적용을 위해서는 설비별 신뢰율 분석이 선행되어야 한다. 신뢰율은 시변 고장률으로써 설비의 위

험도가 욱조곡선(Bathtub Curve)의 형태로 나타나는 것을 말한다. 막대한 양의 배전설비별로, 그 설비별 특성에 맞는 고장모드 분석과 설비가 설치되고부터 현재까지의 고장 이력을 바탕으로 설비별 Bathtub Curve를 도출하는 것이 필수적이다. 또한 정전의 영향을 분석하여 배전계통의 신뢰도를 재고한 적절한 시설투자 및 유지보수 계획의 수립이 필요하다. 이러한 과정들을 통하여 설비별 최적의 유지보수 기법을 제시할 수 있다.

본 논문에서는 최적의 유지보수 주기를 찾기 위해 Markov 모델을 이용하였다. 또한 시변 고장률을 적용하기 위하여 multiple four state 모델을 사용하였으며, 최적의 유지보수 주기를 찾기 위한 목적함수를 결정하여 최적화 문제로 정리하였다.

2. Markov 연쇄 모델

어떤 시스템이 잘 정의된 상태를 가지고 있고, 시간에 따라 어떠한 상태로 갈지 모르는 불확실한 동적 시스템을 모델링 할 때, 마르코프 연쇄 모델의 적용이 적당하다. 구체적으로 통신, 자동 제어, 신호 처리, 경제학 등에 Markov 연쇄가 적용되고 있다[2].

본 논문에서 연구하는 배전계통의 기기도 정상상태, 이상 감지 상태 등과 같이 잘 정의된 상태를 가지고 있으며, 시간이 흐름에 따라 다음 상태가 무엇이 될지 불확실한 동적 시스템이므로, 마르코프 연쇄를 적용하는 것이 적당하다.

마르코프 연쇄를 이용한 모델에서 정의되어야 할 상태를 배전계통 기기의 특성에 맞게 정의하면, Normal(정상), Failure(고장), Defect(이상감지), Preventive(유지보수), Separated(분리)의 5개 상태로 정의하는 것이 적당하다. 그림 1은 위의 다섯 가지 상태가 포함되어 있는 Five-state 모델을 나타낸 것이다[3]. 정상상태는 기기가 정상적인 작동을 하는 상태를 의미한다. 점검 상태는 기기의 결합여부를 점검하는 상태를 의미한다. 고장상태는 정상적인 상태에서 기기에 고장이 생긴 상태이다. 이상 감지 상태는 기기의 이상이 감지된 상태이고, 분리 상태는 이상감지 상태에서 점검을 통해 기기의 결합이 발견된 상태이다.

본 논문에서는 매년 증가하는 시변 고장률을 적용하기 위해서 그림 3과 같은 multiple모델을 사용하였다. 유지보수(Preventive)는 해가 넘어가는 시점에 행하는 것으로 하여 그림 1의 Five-state 모델에서 Preventive 상태를 제외하여 Four-state 모델을 사용하였다. 즉, 그림 3의 multiple 모델에서 해가 바뀌는 시점에 Preventive 상태가 존재하는 것으로 수정하였다. Preventive 상태가 제외된 Four-state 모델은 그림 2와 같다.

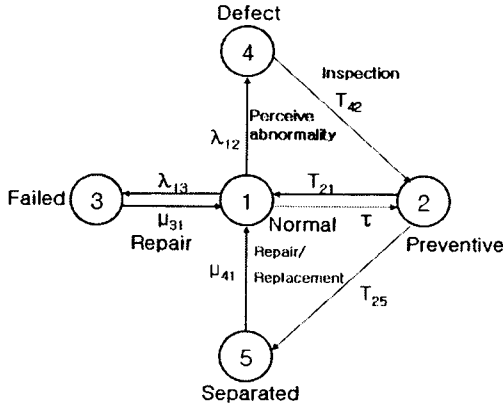


그림 1 Five State Markov Model

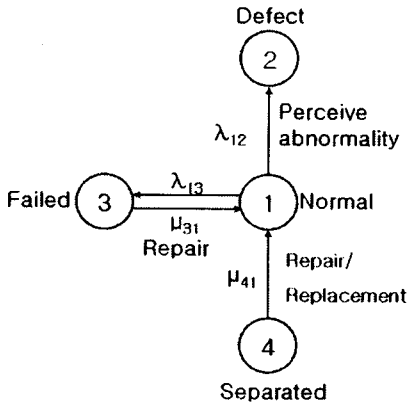


그림 2 Four State Markov Model

고장상태와 분리 상태는 기기가 고장이 난 상태라는 점에서는 동일하지만, 고장상태는 정상적인 상태에서 자연적으로 기계에 고장이 생긴 상태이고, 분리 상태는 인위적인 점검을 통해 기계의 결함이 발견된 상태이다. 결국, 두 상태는 동작이 멈춰진 상태인 것은 같지만, 상태에서의 비용이 차이가 나므로 두 개의 상태로 구분하였다.

Four state model에서 각각의 parameter들은 다음과 같다.

- λ_{13} : 고장률
- λ_{12} : 이상감지 확률
- μ_{31} : 고장에서 정상으로 가기 위한 수리율
- μ_{41} : 분리에서 정상으로 가기 위한 수리율
- T_{21} : 유지보수 시간
- τ_1 : 유지보수 주기

그림 2에서 각 상태에 있을 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_1(t+1) = (1 - \lambda_{12} - \lambda_{13})P_1(t) + \mu_{31}P_3(t) + \mu_{41}P_4(t) \quad (1)$$

$$P_2(t+1) = \lambda_{12}P_1(t) \quad (2)$$

$$P_3(t+1) = \lambda_{13}P_1(t) + (1 - \mu_{31})P_3(t) \quad (3)$$

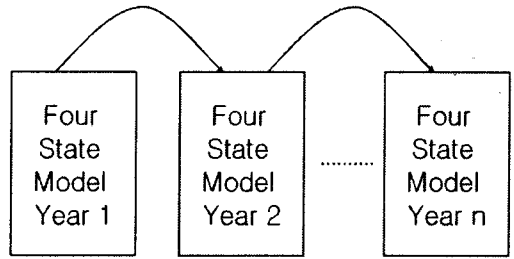


그림 3 multiple four state model

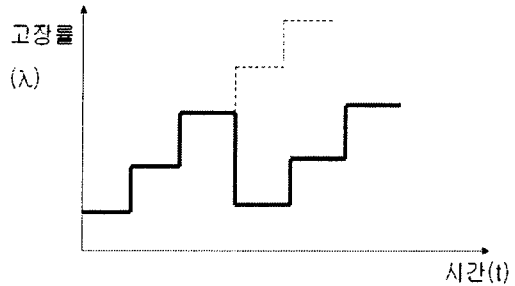


그림 4 시변 고장률

각 상태에 있을 확률은 식 (1)-(3)과 같고, 평형상태 기에서 $P(t+1)=P(t)$ 로 놓고 풀어서 구한다. 고장률은 매년 증가하는 시변 고장률을 이용하였다. 매년 증가하는 시변 고장률을 적용하기 위하여 그림 3과 같은 모델을 사용하였다[4]. 그림 3의 각 상자에는 1년 동안의 four state Markov 모델이 있다. 유지보수는 해가 바뀌는 시점에서 행한다. 이는 앞서 말한 기기의 다섯 가지의 상태 중 Preventive 상태가 제외된 four state model로 결정한 이유이다. 고장률이 매년 변하기 때문에 각각의 four state Markov 모델의 전이율은 서로 다르다. 그림 3에서 각 상자안의 모델에서 전이율은 충분히 긴 시간에서는 일정한 값을 가진다.

1년이 지나면, 모델은 다음 해의 모델로 넘어가게 되고, 이 때 새로운 전이율을 사용한다[4]. 또한 기기에 대해 유지보수를 하게 되면 고장률이 감소한다. 그림 4에서 유지보수를 하지 않으면 점선으로 표시되어 있는 것과 같이 고장률이 단계 적으로 증가하지만, 유지보수를 할 경우 굵은 선으로 나타난 것과 같이 유지보수를 하는 시점에서 고장률이 줄어든다.

3. 목적함수

최적의 유지보수 주기를 결정하기 위해서는 목적함수가 필요하다. 목적함수는 유지보수에 대한 비용, 기기의 고장에 의한 수리비용과 이에 따라 발생하는 비용을 포함하고 이를 최소화해야 하며, 기기의 신뢰도를 일정 수준으로 유지시켜야 한다.

목적함수는 두 가지 종류의 비용으로 구성되어 있다. 각각의 상태에 있음으로 인해서 발생하는 비용과 어떤 상태에서 다른 상태를 이동함으로써 인해 발생하는 비용으로 나눌 수 있다. 이 두 가지 비용의 합이 총 비용이 되며, 총 비용이 목적함수가 된다. 단일 상태에서 발생하는 비용은 그 상태에 있을 확률과 그 상태에서 발생하는 비용의 곱의 형태로 나타낼 수 있고, 상태 이동으로 인해 발생하는 비용은 상태를 이동하는 횟수와 상태를 이동할 때 발생하는 비용의 곱으로 나타낼 수 있다. 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

- 단일 상태에서 발생하는 비용(State Cost) : $p_i \times r_{ii}$

$$SC = \sum p_i r_{ii} \quad (4)$$

- 상태 이동시 발생 비용(Transition Cost) : $f_{ij} \times r_{ij}$

$$TC = \sum_{i \neq j} f_{ij} r_{ij} \quad (5)$$

- p_i : 상태에 머물 확률
- r_{ii} : 상태 발생 비용
- r_{ij} : 상태 이동 시 발생 비용
- f_{ij} : 상태 이동 빈도

- 총 비용(Total Cost)

$$C_{total} = SC + TC \quad (6)$$

상태 이동 빈도는 상태에 있을 확률과 전이율의 곱으로 구할 수 있다.

4. 시뮬레이션

그림 3의 모델에서 최적의 유지보수 주기를 찾는 방법은 다음과 같다.

초기값으로 유지보수 주기를 작은 값(1년)으로 두고 그에 대한 총 비용을 계산한다. 그 다음, 주기를 2년으로 증가시켜 이에 대한 총 비용을 계산한다. 이와 같이 주기의 값을 단계적으로 증가시켜 반복하여 총 비용을 계산한다. 그 결과로 각 유지보수 주기에 대해서 발생하는 총 비용의 그래프를 그릴 수 있다. 그림 5는 기간을 20년으로 하여 계산한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 5에서 x축은 유지보수 주기를 나타내고, y축은 기기의 유지보수 비용과 고장 발생에 따른 비용을 고려한 총 비용을 나타낸다.

그림 5에서 Opt(5년) 지점에서 총 비용이 가장 적기 때문에 찾고자 하는 최적의 유지보수 주기가 된다. Opt 지점보다 유지보수 주기가 짧은, 그래프 좌측 부분에서는 유지보수가 과도하게 되어 총 비용이 늘어난다. 반면에 Opt 지점보다 유지보수 주기가 긴, 그래프의 우측 부분에서는 유지보수에 들어가는 비용은 줄어들지만 고장이 나는 빈도가 증가하여 고장 발생에 따른 비용이 늘어나게 되어 총 비용이 늘어난다. 즉 경제성이 감소한 것이다.

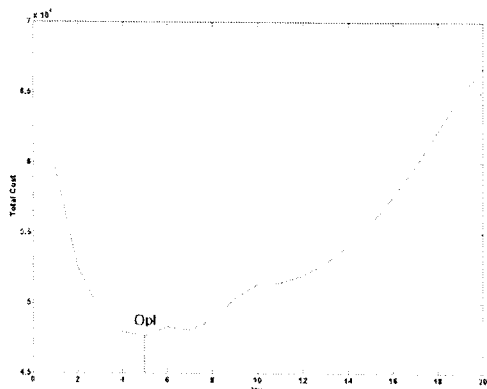


그림 5 총비용 vs. 유지보수 주기

산업구조의 효율화 정책아래 전력산업 분야에의 경쟁적 시장 개념의 도입이 전 세계적으로 추진되고 있으며, 우리나라 또한 조만간 경쟁적 전력시장이 대두할 것으로 판단된다. 경쟁적 전력 시장 하에서는 배전계통 설비의 유지보수 시 적극적으로 이윤을 추구하게 된다.

이에 본 논문에서는 효율적으로 유지보수를 하기 위한 방법으로 한정된 비용으로 신뢰도를 일정 수준으로 유지하는 유지보수 방법인 RCM을 사용하였다. 최적의 유지보수 주기를 찾기 위해서 Four-state Markov 모델을 사용하였다. 고장률이 매년 변화하는 시변 고장률을 반영하기 위해 multiple four state model을 사용하였으며, 또한 유지보수를 행하는 것에 의해서 고장률이 감소하는 것도 고려하여 유지보수 주기의 최적값을 찾았다. 목적함수는 단일 상태에 있을 때 발생하는 비용과 상태를 이동함에 따라 발생하는 비용을 포함하고 있다. 유지보수 주기의 최적값은 목적함수를 최소화하는 값을 찾음으로써 결정할 수 있었다.

수많은 모든 배전 설비에 대해 RCM기법을 적용하기에는 현실적으로는 불가능하며, 이는 해외에서도 하나의 설비씩 별도로 RCM 기법을 적용하는 것에서도 알 수 있다. 그러므로 여러 배전 설비들 중에서 고장 모드 분석 및 통계자료를 분석하여, RCM 적용 시 효과적으로 유지보수를 수행 할 수 있는 주요 배전 설비를 결정해야 한다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제이며 관계 기관에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Rausand, "Reliability centered maintenance", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 60, pp. 121-132, 1998.
- [2] D. P. Bertsekas, John N. Tsitsiklis, "Introduction to Probability", Athena Scientific, MA, USA, 2002.
- [3] J. P. Siqueira, "Optimum reliability-centered maintenance task frequencies for power system equipments", 8th International conference on probabilistic methods applied to power systems, Iowa State University, Ames, Iowa, 2004.
- [4] P. A. Kuntz, "A reliability centered optimal visual inspection model for distribution feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 4, 2001.
- [5] A. H. Christer and W. M. Waller, "Delay time models of industrial inspection maintenance problems", Journal of the Operational Research Society, Vol. 35, no.5, pp.401-406, 1984.
- [6] A. H. Christer and D. F. Redmond, "Revising models of maintenance and inspection", International Journal of Production Economics, Vol 24, no. 3, pp. 227-234, 1992.
- [7] H. Luss, "Maintenance policies when deterioration can be observed by inspection", Operations Research, Vol. 24, npo. 2, pp. 359-366, 1976.
- [8] S. Madanat, "Incorporating inspection decisions in pavement management", Transportation Research-Park B, Vol. 27B, no. 6, PP. 425-438, 1993.