

## 철도전기설비의 최적점검주기에 관한 기초연구

(Study on a Optimal Inspection Cycle of Electrical facility of Railroad)

추철민\* · 김재철\* · 이희태\* · 안재민\* · 문종필\*\*

(Cheol-Min Chu · Jae-Chul Kim · Tae-Hee Lee · Jae-Min An · Jong-Fil Moon)

### Abstract

It is focused on a methodology to establish a optimal inspection cycle of electrical facility of railroad. Decision method of optimal inspection cycle is a process which establishes maintenance plan for facilities' immanent function as using reliability theory in operation term. In order to ensure normal operation in a given condition, the decision method is logical for selecting effective maintenance plan to consider characteristic of system. In estimation of failure rate, critical facility is selected firstly. After that, proper distribution function on each facility is decided to investigate distribution function for extraction of failure rate. Next, cost produced by the case that facility's failure is occurred is surveyed. Finally, maintenance method developed until now is investigated, before suitable model for the facility applying maintenance method is developed, and that maintenance decision is made. Therefore, this process is the method to find optimal inspection cycle for reasonable cost and effective reliability on facility.

### 1. 서론

최근 많은 분야에서 설비의 경제적인 유지보수 방법이 연구되어지고 있다.[1,2] 설비의 경제적인 유지보수를 위하여 사용되어지는 방법은 유지보수 기간의 최적화를 의미하며 이러한 최적점검주기결정은 설비의 신뢰도에 기반을 두고 한정적인 예산에서 최대의 결과를 도출할 수 있는 방법을 결정하는 것이다.

최적의 점검주기결정을 위해서는 설비의 과거이력파 설비별 특성에 맞는 고장모드 분석과 설비가 설치되고 부터 현재까지의 고장 이력을 바탕으로 설비별 고장률을 도출하는 것이 필수적이다. 또한 설비 고장 시 발생하는 비용에 대한 정보가 필요하다. 결과적으로 설비 고장의 영향을 분석하여 신뢰도를 제고한 적절한 유지보수 계획의 수립되어지는 방법이 필요하다. 이러한 과정은 설비별 최적의 유지보수주기와 경제성을 고려한 한정된 예산에서 최대의 신뢰도를 유지할 수 있는 방안이 제시되어진다. 따라서 유지보수 비용대비 얻어지는 신뢰도 이득(B/C : Benefit to Cost Ratio)이 최대가 되도록 유지보수를 할 수 있는 최적화 기법이 필요하다.

본 논문에서는 전기 철도관련 설비의 유지보수를 위한 최적주기결정방법을 제시한다. 각 설비의 고장이력 데이터를 통해 각 설비의 고장률을 도출하고 이러한 고장률을 이용하여 Markov 모델을 제안한다.

### 2. 최적주기결정기법

#### 2.1 최적주기결정을 위한 고장률 평가기법

고장률은 시간의 변화에 따른 고장발생빈도율의 변화를 나타낼 수 있어야한다. 따라서 여러 가지의 확률밀도함수에서 시간당 임의의 비율로 고장이 발생하고 있는가를 나타내는 고장확률밀도함수의 종류는 지수분포로 임의고장을, Weibull 분포로 열화고장을 나타낼 수 있다.

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{1}{\theta}t} \quad (1)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$E(T) = MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

지수분포의 정의는 연속형 확률변수 t의 확률밀도함수가 식 (1)은  $1/\theta$ 은 고장밀도함수의 모수이며, 이것은 평균수명을 나타내며 각 수식은 다음과 같다. (R : 신뢰도 함수, E : 기대수명,  $\lambda$  : 고장률)

와이블 분포는 욕조곡선(bathhtub curve)의 감소, 일정, 증가 부분 모두를 표현할 수 있기 때문에 고장률 함수로 많이 쓰이고 와이블 분포 관련 식은 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (5)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (6)$$

$$E(T) = MTTF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (7)$$

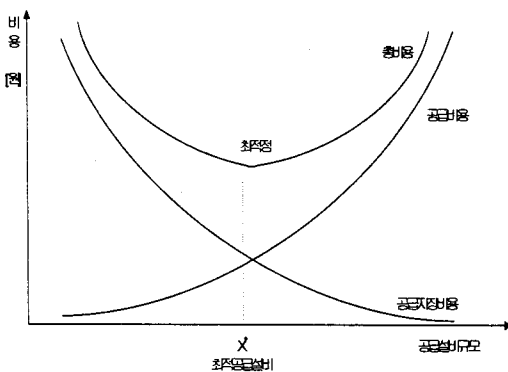
$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \quad (8)$$

### 2.3 신뢰도 비용

신뢰도 비용은 평가대상시스템에서 서비스공급지장비용을 말한다.[2] 다양한 공급지장비용(outage cost or failure cost)의 형태는 철도 설비에 과다하게 되면 투자비의 과중으로 공급 비용(utility cost)이 고객의 서비스요금 증가로 나타나고 부족하면 정전 등으로 인한 공급지장이 고객의 수용가에 손해를 주는 결과로 나타난다.

따라서 서비스공급자와 수용가의 모든 비용이 최소가 되는 최적 전력 투자 규모의 산정과 사용자에 대한 적정 피해의 보상액을 제시하기 위해서는 공급지장비용의 합의 최적이 전력 공급설비의 규모를 결정하는 중요요소가 되며 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

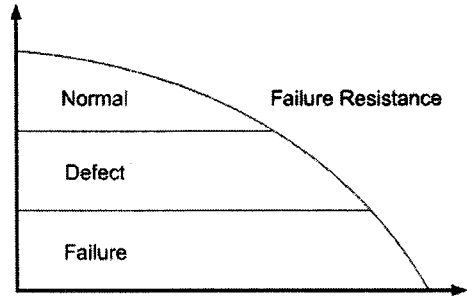
$$\min T_c = \text{공급비용(utility cost : } U_c) + \text{공급지장비용(outage cost : } O_c) \quad (9)$$



<그림 1> 공급비용과 공급지장비용과의 관계

### 22. 전기철도 전력기기 유지보수주기 평가모델

최적점검주기결정기법을 위한 모델은 잠재적인 고장과 기능적인 고장의 개념을 표현해야만 한다. 이러한 개념은 기본적으로 잠재적인 고장(Normal), 결함 상태(Defect), 고장상태(Failure)등 세 가지 정도가 있다.



<그림 2> Failure resistance curve

이 외에도, 분류에 따라 preventive 혹은 corrective 진단 상태에 있을 수도 있다. 여기서, 어느 시간에서든 기기의 5가지 상태를 다음과 같이 정의할 수 있다.

- Normal- 그것의 동작 기능을 수행
- Preventive- 예방보수 하에 있는
- Failure- 기능적인 고장후 이용할 수 없는(불가용;Unavailable)
- Defect- 가용한 상태, 그러나 잠재된 고장을 갖고 있는
- Corrective- 잠재된 고장에 의해 보수 하에 있는

다음으로 기기의 상태를 변화시키는 event를 정의 할 수 있다.

- preventive : 계획된 조사 혹은 보수
- Corrective : 계획된 잠재된 고장을 보수
- repair : 기능적인 고장을 보수
- Defect : 부분적인 혹은 잠재적인 기능의 감퇴
- Failure : 기능적인 고장으로 인한 정전

처음 세 가지 event는 외부적인 보수 event이고, 마지막 두 개는 내부 고장 event이다. 모델에서 점선사이의 적절한 선택을 함으로써 ARP(age replacement) 정책, BRP(Block replacement) 정책, MRP(최소 수리) 정책등과 같은 전형적인 보수 정책을 표현할 수 있다.

모델에서 Chapman-Kolmogorov 공식을 이용하여 각 각의 상태 확률을 정량화할 수 있다.

$$dP_i/dt = \sum_j (P_j \lambda_{ji}) - P_i \sum_j \lambda_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (10)$$

$P_i$ 는 상태  $i$ 의 확률,  $\lambda_{ij}$ 는  $i$ 상태에서  $j$ 상태로 변환율을 나타낸다. 모델을 사용하기 위해서는 파라미터들, 즉 고장율과 결함율이 주어져야 한다. 이러한 것은 두 가지 일반적인 설비의 고장 동작을 정의하는 파라미터로 요약되어질 수 있다.

· defect rate - 시간  $t$ 에서 결함이 없다는 조건하에서 시간 간격  $dt$ 에서 결함이나 잠재된 고장이 있을 확률 밀도

· failure rate - 시간  $t$ 에서 고장이 없고 시간 0에서 잠재된 고장 혹은 결함이 존재한다는 조건하에서 시간 간격  $dt$ 에서 기능적인 고장이 있을 확률밀도

결과적으로 그 모델을 사용할 때 모델의 주 파라미터인 고장률( $\lambda_f = \lambda_{43}$ )과 결함률( $\lambda_f = \lambda_{14}$ )은 다른 관찰 가능한(Observable) 변수로부터 추론되어야 한다. 이러한 관찰 가능한 변수는 시각적인 사건(Visible events)과 그것들의 기간(duration)이며 다음과 같다.

- forced outage frequency  $F_f = F_{43}$
- preventive maintenance frequency  $F_P$
- Corrective maintenance frequency  $F_c = 1/T_{42}$
- mean time to maintain  $MTTM = T_2$
- mean time to repair  $MTTR = T_3$
- mean time to correct  $MTTC = T_5$

표본의 모집단이 주어지면 통계치와 샘플 표본의 평균치를 통하여 시스템에 그 기기의 양에 따라 각 기기의 기여 정도로부터 파라미터들을 구한다. 최종적인 값은 유지보수 정책과 빈도가 상수로 고정되어지도록 시간 창(time window)이 있는 상태에서 각 기기의 관찰 가능한 이력 데이터를 측정함으로써 추정된다. 이를 통하여 각각의 고장 모드에서 ARP와 BRP에 대해 고장률과 결함률을 줄 것이다.

$$\lambda_f = \frac{F_f F_P}{F_c} = \frac{1}{MTTF} \quad (11)$$

$$\lambda_d = \frac{F_P(F_c + F_f)}{F_p - F_f^2 T_p - F_p F_f T_r - F_c - F_p F_c T_c} = \frac{1}{MTTD} \quad (12)$$

MRP정책에서 마지막 공식은 다음과 같다.

$$\lambda_d = \frac{F_p F_c}{F_p - F_p^2 T_p - F_p F_f T_r - F_c - F_p F_c T_c} = \frac{1}{MTTD} \quad (13)$$

위 모델을 이용하여 아래 식과 같은 목적함수를 이용하여 최적 점검 주기를 구한다.

$$I = K_p F_p + K_r E_r + K_c F_c \quad (14)$$

여기서  $I$  : Scalar indicator or objective function

$K_p$  : preventive return rate

$K_c$  : corrective return rate

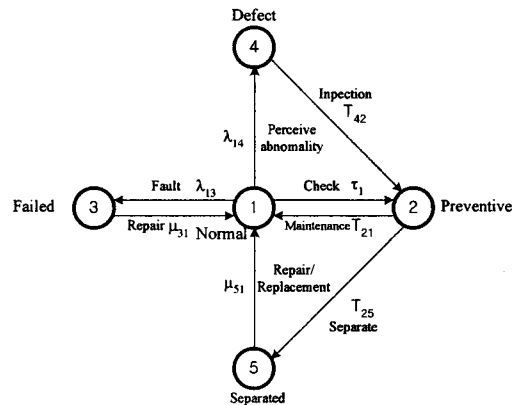
$K_r$  : repair return rate

$F_p$  : preventive maintenance frequency

$F_c$  : corrective maintenance frequency

$F_r$  : repair frequency

다음 그림과 같은 5-state 모델을 만들어 사례연구를 한다.



<그림 3> 5-state 모델

모델에서 찾고자 하는 것은 최적  $\tau$ 이다. 나머지 변수들은 모두 문제에서 주어져야 한다. 모델이 5개 상태이므로, 전이율 행렬 A는 다음과 같이 구성된다.

$$A = \begin{pmatrix} -\sum_{j=2}^5 a_{1j} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & -\sum_{j=1}^5 a_{2j} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & -\sum_{j=1, j \neq 3}^5 a_{3j} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & -\sum_{j=1}^5 a_{4j} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & -\sum_{j=1}^4 a_{5j} \end{pmatrix} \quad (15)$$

- 평형상태를 이용한 목적함수: 비용은 평형상태에서 단위시간(1년)당 발생하는 비용으로 일정한 값으로 표시된다. Matlab으로 구한비용  $\{V(t)\}$ 와 평형상태에서의 비용( $C_{total}$ )과의 관계는  $V(t) = t \cdot C_{total}$  이다. 즉 Matlab을 이용하여 구해진 최적의  $\tau$  값은  $C_{total}$ 을 최소로 만드는  $\tau$  값이 되어야 한다.  $C_{total}$ 은 state에서 발생하는 비용과 state 이동할 때 발생하는 비용의 합이며, 3 가지 상태 모델에서의 식은 아래와 같이 구해진다.

- 단일 상태에서 발생하는 비용

$$SC = P_1 \times r_{11} + P_2 \times r_{22} + P_3 \times r_{33} + P_4 \times r_{44} + P_5 \times r_{55} \\ = \sum_{i=1}^5 P_i r_{ii} \quad (16)$$

- 상태 이동간 발생하는 비용 : 이동간 발생 비용 X 이동 빈도

$$TrC = f_{12} \times r_{12} + f_{13} \times r_{13} + f_{14} \times r_{14} + f_{15} \times r_{15} \\ + f_{21} \times r_{21} + f_{23} \times r_{23} + f_{24} \times r_{24} + f_{25} \times r_{25} \\ + f_{31} \times r_{31} + f_{32} \times r_{32} + f_{34} \times r_{34} + f_{35} \times r_{35} \\ + f_{41} \times r_{41} + f_{42} \times r_{42} + f_{43} \times r_{43} + f_{45} \times r_{45} \\ + f_{51} \times r_{51} + f_{52} \times r_{52} + f_{53} \times r_{53} + f_{54} \times r_{54} \\ = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 f_{ij} r_{ij} \quad (i \neq j) \quad (17) \\ f_{ij} = P_i \times [Transition\_rate\_from\_i\_to\_j]$$

총 비용은 각 상태의 비용과 상태 이동간 발생 비용을 합한 것이다.

$$C_{total} = SC + TrC \quad (18)$$

여기서 r은 상태 변화 간에 발생하는 비용으로 지정 값이며, p는 상태에 있을 확률이고, f는 상태 이동 빈도로 다음과 같이 구해진다.

상태에 머물 확률 P는 다음과 같다.

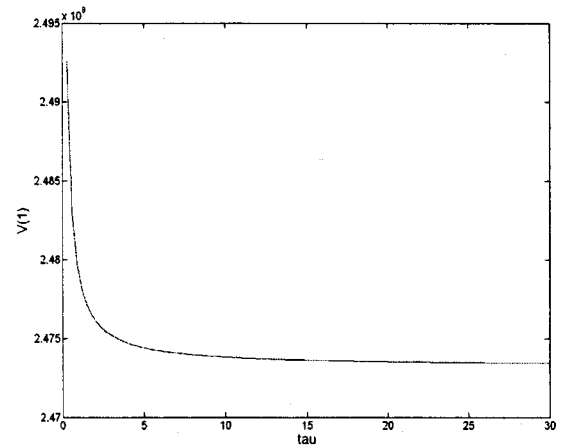
$$P_1(t+1) = P_1(t)(1 - \lambda_{12} - \lambda_{13}) + P_2(t)\lambda_{21} + P_3(t)\lambda_{31} \quad (19)$$

$$P_2(t+1) = P_1(t)\lambda_{12} + P_2(t)(1 - \lambda_{21} - \lambda_{23}) + P_3(t)\lambda_{32} \quad (20)$$

$$P_3(t+1) = P_1(t)\lambda_{13} + P_2(t)\lambda_{23} + P_3(t)(1 - \lambda_{31} - \lambda_{32}) \quad (21)$$

이고, 평형상태기에  $P(t+1) = P(t)$ 로 놓고 풀어서 구한다. 상태 간 이동빈도  $f_{ij} = p_i a_{ij}$ 로 i 상태에 있을 확률(p, 1번에서 구한 값)과 i 에서 j 로 전이율( $a_{ij}$ )의 곱으로 구성된다. 상태에 있을 확률 p가  $\tau$ 에 관한 식이고, 이동빈도 f 는 p 와 a 의 곱으로 이루어지기에  $\tau$ 에 관한 식으로 표현이 된다.

위의 5-state 모델에 대하여  $\tau$ 를 가변하며, 총 비용을 구해본 결과는 아래의 그림과 같다.



<그림 4> 유지보수 주기에 따른 총 비용 곡선 (5-state 모델)

### 3. 결론

최적주기결정기법은 현재까지의 진단 기법을 이용하여, 원하는 신뢰도 수준을 유지하면서 비용이 최소가 되도록 유지보수 업무를 수행하는 기법이다.

최적주기결정의 목적으로 최소의 비용으로 최대의 효과를 내는 것임을 생각할 때, 기법의 목적함수는 신뢰도 관련 요소(고장률, 수리율 등), 정전비용 관련 요소(수용가별 정전비용) 및 현재의 TBM, CBM 기법 등이 총 망라될 것이다.

본 논문에서는 최적점검주기를 결정하기 위해 다음과 같은 과정을 수행하여 예제로 5-states를 수행하였다. 이러한 과정을 정리하면 다음과 같다.

1) 최적주기결정의 기본 과정을 정리하였다. 이는 해외 선진국에서 적용하는 가장 기본이 되는 과정으로서 향후 최적주기 적용 시 가장 기초가 될 것이다.

2) 고장률, 수리율 등의 추출을 위한 기초 연구로, 분포함수에 대하여 알아보았다. 율(rate)을 추출하기 위한 분포함수는 여러 가지가 있으며, 이는 각 설비의 고장 데이터에 맞게 적절한 분포함수를 이용하여야 한다. 일반적으로 전력기기의 고장률은 bathtub 곡선을 따르기 때문에 이에 적합한 모델은 지수함수와 와이불 함수가 될 것이다.

3) 공급지장비용을 목적함수에 포함시키기 위하여 지장비용 이론을 정리하였다. 최적주기기법 적용을 위해서는 기기에 고장이 발생하였을 경우, 이에 의해 공급되는 비용을 목적함수에 반드시 포함시켜야 한다. 여기서는 전력계통에서 적용할 수 있는 신뢰도 비용에 대하여 정리하였다.

4) Markov 모델 이론을 정리하였다. 해외 선진국에서 사용하는 모델이 대부분 Markov 모델을 이용하기 때문에, Markov 모델에 대한 이해는 필수적이다.

최적점검주기결정기법은 신뢰도 이론과 진단기법을 적용한 현재까지 가장 경제적인 진단기법이다. 본 논문은 주기결정연구를 위한 기초 조사를 하였다. 이를 현장에 적용하기 위해서는 각 기기 특성에 맞는 모델 개발, 각 모델에 적합한 고장을 및 복구율 추출, 고장시

발생되는 비용 개발 등 사전 데이터가 필요하여 모델 개발에 보다 많은 추가 연구를 수행하여야 할 것이다.

### References

- [1] Dekker, R. & Smeitink, E. "Preventive maintenance at opportunities of restricted duration", *Naval Research Logistics*, 41, pp. 335-353, 1994.
- [2] Thomas F. Hassett, "Time-Varying Failure Rates in the Availability & Reliability Analysis of Repairable System", *IEEE Trans. on Reliability*, Vol. 44, No. 1, Mar. 1995.
- [3] M. Stein, "Contributions to Applying the RCM in Power Installations", *IEE Conference*, 1997.
- [4] L. Bertling, R. N. Allan, "Reliability Centered Maintenance Applied to Electrical Distribution Systems", *International Conference on Power Tech*, 1999.
- [5] Wenyuan Li, "Incorporating Aging Failures in Power System Reliability Evaluation", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 17, No. 3, Aug. 2002.
- [6] Neil Arthur, "Dairy Processing Site Performance Improvement using RCM", 2004
- [7] David Lubkeman, "Large Scale Storm Outage Management", 2004
- [8] Anil Pahwa, "Effect of Environmental Factors on Failure of Overhead Distribution Feeders", 2004.
- [9] Marvin Rausand, "Reliability centered maintenance", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 60, pp. 121-132, 1998.
- [10] K. S. Wang, "Modeling the bathtub shape hazard rate function in terms of reliability", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 75, 2002
- [11] D. N. Prabhakar, "Weibull model selection for reliability modelling", *Reliability Engineering and System Safety*, 2004.
- [12] M. Rausand, "Reliability centered maintenance", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 60, pp. 121-132, 1998.
- [13] 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.
- [14] P. A. Kuntz, "A reliability centered optimal visual inspection model for distribution feeders", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, 2001.
- [15] 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.