

# 비용함수를 이용한 VVVF 전동차 제동장치의 시스템 구조 및 신뢰도 최적화

김 세 훈<sup>1)</sup> · 김 현 준<sup>1)</sup> · 배 철 호<sup>1)</sup> · 이 정 환<sup>1)</sup> · 이 호 용<sup>2)</sup> · 서 명 원<sup>3)</sup>

성균관대학교 기계공학부 대학원<sup>1)</sup> · 한국철도기술연구원<sup>2)</sup> · 성균관대학교 기계공학과<sup>3)</sup>

## System Structure and Reliability Optimization of VVVF Urban Transit Brake System Through Cost Function Construction

Sehoon Kim<sup>1)</sup> · Hyunjun Kim<sup>1)</sup> · Chulho Bae<sup>1)</sup> · Junghwan Lee<sup>1)</sup> · Hoyong Lee<sup>2)</sup> · Myungwon Suh<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>Graduated School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

<sup>2)</sup>Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woulam-dong, Uliwang-si, Gyeonggi 437-050, Korea

<sup>3)</sup>School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

(Received 1 August 2006 / Accepted 8 November 2006)

**Abstract :** During the design phase of a product, reliability and design engineers are called upon to evaluate the reliability of the system. The question of how to meet target reliability for the system arises when estimated reliability or cost is inadequate. This then becomes a problem of reliability allocation and system structure design. This study proposes the optimization methodology to achieve target reliability with minimum cost through construction of the cost function of system. In cost function, total cost means the sum of initial cost, repair cost and maintenance cost. This study constructs optimization problem about system structure design and reliability allocation using cost function. This problem constructed is solved by Multi-island Genetic Algorithm(MIGA), and applies to urban transit brake system. Current brake system of the urban transit is series system. Series system is the simplest and perhaps one of the most common system, but it demands high reliability and maintenance cost because all components must be operating to ensure system operation. Thus this study makes a comparative study by applying k-out-of-n system to brake system. This methodology presented can be a great tool for aiding reliability and design engineers in their decision-makings.

**Key words :** Reliability allocation(신뢰성 할당), System structure design(시스템 구조 설계), Initial cost(초기비용), Repair cost(수리비용), Maintenance cost(관리비용), Genetic algorithm(유전자 알고리즘), k-out-of-n system(리턴던트 시스템)

### 1. 서론

최근 들어 해외에서의 시장 확보를 위한 경쟁이 심화됨에 따라 국내의 기업들도 국제 경쟁력 강화를 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 아무리 제품이 우수한 기능을 지니고 있더라도, 기대하는 시간 동안 시스템을 안정적으로 사용할 수 없다면 시스템의 가치는 떨어지기 마련이다. 따라서 이를 실현

하기 위해 기술 개발에 따른 합리적인 신뢰도 설계를 위한 신뢰성 기술의 필요성이 증대되고 있으며, 다양한 방법을 통해 연구가 진행되고 있다.

Manolis<sup>1)</sup>은 인공신경망을 통한 신뢰성을 기반으로 한 구조설계를 하였으며, Paint<sup>2)</sup>는 유전자 알고리즘을 이용하여 시스템 신뢰도 최적화를 구현하였다. 그리고 김현준<sup>3)</sup>은 인공신경망과 유전자알고리즘을 혼합한 Neuro-Genetic Technique를 사용하여 비선형문제에 적합한 신뢰성기반의 시스템 최적화

\*Corresponding author, E-mail: suhmw7447@skku.edu

방법론을 제시하였다.

그러나 최근 들어 시스템과 이를 구성하는 하위 시스템/장치의 기능면에서의 요구가 다양해짐에 따라 기술 개발에 따른 경제적 제약이 차지하는 비중이 커진다. 따라서 경제성을 벗어난 신뢰도 최적화 방법론은 큰 의미를 가지기 힘들게 되었다.

또한 본 연구의 적용대상인 도시철도 전동차는 전기, 기계적으로 결합된 매우 복잡한 구조를 가진 대형시스템으로 고속주행에 따른 안전성의 확보가 필수적이다. 이러한 안전성 확보를 위해 전동차 유지보수 측면에서 필요한 비용은 전체 운영비의 60% 정도를 차지할 정도로 그 영향력이 크다.<sup>4)</sup> 그러므로 도시철도 전동차의 안전성 확보를 위한 신뢰성 설계와 경제적 제약에 대응하는 합리적인 유지보수의 기준 마련이 절실한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 경제성의 척도가 되는 비용을 최소화하기 위해, 시스템의 비용함수를 구축하고, 유전자 알고리즘을 통한 시스템의 목표 신뢰도를 만족하는 각 컴포넌트의 신뢰도와 시스템 구조를 최적화하는 방법을 제시한다. 최종적으로 이를 VVVF 전동차 브레이크 시스템에 비용함수를 적용하여 시스템 구조 및 각 컴포넌트의 신뢰도를 최적화한다.

## 2. 문제의 정의

본 연구는  $n$ 개의 컴포넌트군으로 구성된 시스템을 최소 비용으로 목표 신뢰도를 만족하고자 한다. 이를 위해 각 컴포넌트의 최적화 신뢰도를 할당하며 시스템의 구조를 최적화한다. 여기서 컴포넌트란 시스템을 구성하는 하위시스템 및 장치를 의미하며, 컴포넌트군은 동일한 컴포넌트로 구성된 집합을 말한다. 시스템의 구조는 리던던트 시스템( $k$ -out-of- $n$  system)으로  $n$ 개의 컴포넌트 중  $k$ 개의 컴포넌트가 작동하여  $(n-k)$ 개의 컴포넌트가 대기 상태로 있는 구조로 일부의 컴포넌트에 고장이 발생하더라도 시스템의 기능을 유지할 수 있는 시스템이다.<sup>5)</sup>

본 연구에서 시스템 최적화를 위해 구성한 목적 함수와 제한조건은 식 (1)과 같다.  $i$  컴포넌트군을 구성하는  $n_i$ 개의 컴포넌트와 시스템에 작용하는  $k_i$

개의 컴포넌트는 동일한 신뢰도를 가진다고 가정한다.

시스템 유지의 총비용이 목적함수가 되며,  $i$  컴포넌트군의 비용은 각 컴포넌트의 신뢰도와 개수의 설계변수로 결정된다. 제한 조건은 전체 시스템의 목표 신뢰도와 각 컴포넌트의 신뢰도의 범위이다.

$$\text{Minimize : } C = \sum_{i=1}^n c_i(r_i, n_i)$$

$$\text{Subject to : } \begin{aligned} r_s &\geq r_g \\ r_{i.\min} &\leq r_i \leq r_{i.\max} \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

- where  $C$  : Total cost of system maintenance,  
 $c_i$  : Cost of component  $i$ ,  
 $n_i$  : The number of component  $i$ ,  
 $r_i$  : Reliability of component  $i$ ,  
 $r_g$  : Target reliability of system,  
 $r_s$  : System reliability,  
 $r_{i.\max}$  : Maximum reliability of component  $i$ ,  
 $r_{i.\min}$  : Minimum reliability of component  $i$ ,

## 3. 비용함수의 정의

본 연구에서는 시스템 유지의 총비용은 각 컴포넌트 유지 비용의 합이며, 시스템 유지의 총 비용을 컴포넌트의 초기 비용, 수리비용, 관리비용의 세 부분으로 나누어 식 (2)와 같이 비용함수를 정의하였다. 그리고 각 비용은 컴포넌트의 특성을 반영하기 위해 계수를 가진다.

$$C = \text{Initial cost} + \text{Repair cost} + \text{Maintenance cost} \quad (2)$$

### 3.1 초기비용

초기비용이란 컴포넌트의 구입비용부터 시스템 설치에 필요한 모든 비용을 의미하며,  $i$  컴포넌트의 개수( $n_i$ )와 초기비용 계수( $c_{1i}$ )간 곱의 총합으로 정의한다. 따라서 초기비용은  $c_{1i}, n_i$ 의 값에 따라 선형적으로 증가하는 값을 가지며, 이를 수식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\text{Initial cost} = \sum_{i=1}^n c_{1i} n_i \quad (3)$$

### 3.2 수리비용

컴포넌트의 고장발생 시 일어나는 수리비용을 확률적 접근을 통해 수리비용을 정의하였다.<sup>6)</sup>  $i$  컴포넌트의 수리비용 계수( $c_{2i}$ )와  $i$  컴포넌트로 인해 발생하는 고장발생의 확률 간의 곱의 합을 총 수리비용으로 한다. 여기서  $i$  컴포넌트로 인해 발생하는 고장은  $i$  컴포넌트의 원인으로 발생하지 않은 시스템의 고장 발생의 경우를 제외한다. 이는 시스템의 고장이 나지 않은 확률인 시스템의 신뢰도( $r_s$ )와  $i$  컴포넌트의 고장발생의 확률( $1-r_i$ )의 곱을 의미한다.

전체 시스템의 신뢰도는 식 (4)에 의해 계산되며, 모든 구조의 시스템에 적용가능하다.

$$r_s(k \leq n) = \prod_{i=1}^n \sum_{j=k}^{n_i} \binom{n_i}{j} r_i^j (1-r_i)^{n_i-j} \quad (4)$$

따라서 전체 수리비용은 각  $i$  컴포넌트의 수리비용의 합으로 식 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$Repair\ cost = \sum_{i=1}^n c_{2i} r_s k_i (1-r_i) \quad (5)$$

### 3.3 관리비용

관리비용은 시스템의 신뢰도를 유지·향상시키기 위한 점검 및 유지비용으로 정의하며, 컴포넌트의 고장데이터는 획득 가능하다는 가정 아래 식 (6)과 같이 나타낸다.<sup>7)</sup>

$$Maintenance\ cost = \sum_{i=1}^n c_{3i} k_i \exp\left( (1-\alpha_i) \frac{r_i - r_{i,min}}{r_{i,max} - r_i} \right) \quad (6)$$

where  $c_{3i}$  : maintenance cost of component  $i$

$\alpha_i$  : maintenance feasibility of component  $i$

위 관리비용 함수는 다음의 3가지의 규칙을 따른다.

- 1) 높은 신뢰도를 유지하는  $i$  컴포넌트의 관리비용은 매우 높다.
- 2) 낮은 신뢰도를 유지하는  $i$  컴포넌트의 관리비용은 매우 낮다.
- 3) 관리비용함수는 신뢰도가 증가함에 따라 기울기가 단조롭게 증가하는 함수이다.

규칙의 타당성을 검증하기 위해 관리비용 함수에

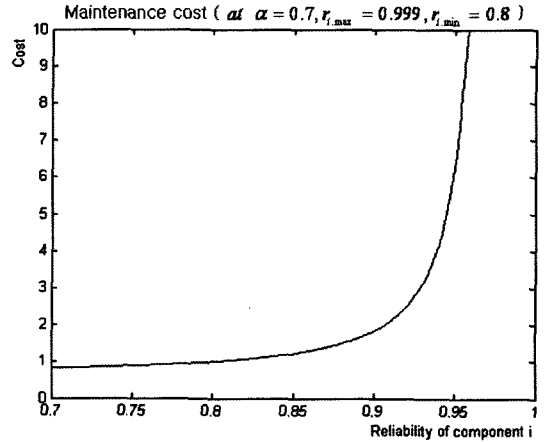


Fig. 1 Effect of reliability on maintenance cost function

$\alpha = 0.7$ ,  $r_{i,max} = 0.999$ ,  $r_{i,min} = 0.8$ 의 값을 적용하여 Fig.1에 그래프로 나타내었다. 적용한 규칙과 동일하게 신뢰도가 커질수록 많은 관리비용이 소비되며, 높은 신뢰도가 요구되는 0.95 이상의 영역에서는 비용이 급격하게 증가함을 확인할 수 있다.

관리비용 함수는 신뢰도의 변화에 따라 민감하게 변화한다. 신뢰도와 평균고장간격(MTBF, Mean Time Between Failure)은 식 (7)과 같은 관계가 있다. 평균고장간격이 커짐에 따라 신뢰도가 증가하는 결과를 Fig. 2의 그래프에서 확인할 수 있다. 이와 같은 관계에서 본 연구는 신뢰의 척도가 되는 평균고장간격으로부터 관리비용함수의 관리용이성( $\alpha$ )의 값을 유도하였다.

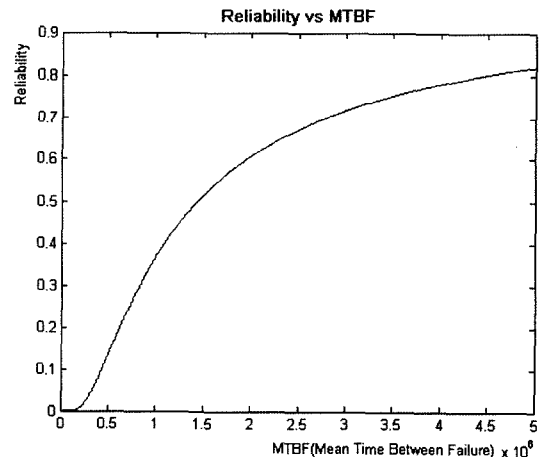


Fig. 2 Effect of MTBF on reliability

$$r(t) = \exp\left[-\int_0^t \frac{1}{MTBF}(t)dt\right] \quad (7)$$

관리용이성( $\alpha$ )은 신뢰도 성장 분석 방법인 Duane Method<sup>8)</sup>를 이용하며, 평균고장간격의 Log-Log 스케일에서 기울기 값을 취한다. Duane Method 이란 컴포넌트의 고장 데이터로부터 추후의 신뢰도를 예측하는 방법으로, 회귀 분석법을 통한 방법론이다. 관리용이성( $\alpha$ )은 일반적으로 0에서 1사이의 값을 가지며, 값이 클수록 시간에 따라 평균고장간격이 증가율이 커지며, 이것은 신뢰도 향상의 용이성을 의미한다.

Fig. 3은 관리용이성이 관리비용함수에 미치는 영향을 보여준다. 같은 신뢰도이지만 관리용이성이 높으면 관리 비용이 적으며, 작은 관리용이성의 경우 높은 신뢰도에 도달하기 어려움을 확인할 수 있다.

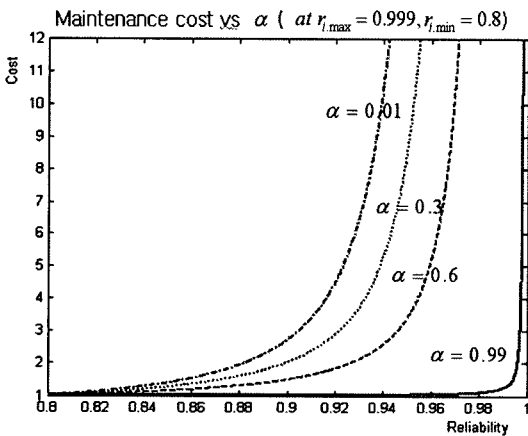


Fig. 3 Effect of  $\alpha$  on maintenance cost function

#### 4. 비용함수의 적용

비용함수의 적용에 앞서  $i$  컴포넌트의 최소 신뢰도( $r_{i,min}$ )는 0.8, 최고 신뢰도( $r_{i,max}$ )는 신뢰도의 최대치인 0.999로 설정하였다.

또한 시스템을 구성하는 컴포넌트군의 개수( $n$ )는 4, 목표 신뢰도는 95%로 정하였다.

초기비용계수( $c_{1i}$ ), 수리비용계수( $c_{2i}$ ), 관리비용계수( $c_{3i}$ ), 관리용이성( $\alpha$ )을 변화시켜 4가지 case에 비용함수를 적용시켜보았다.

case 1) 컴포넌트 1, 2, 3, 4의  $c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}, \alpha_i$ 의 값이

10, 20, 0.5, 0.6로 동일한 경우로 상대적으로 초기비용이 관리비용에 비해 큰 경우.

case 2) 컴포넌트 1, 2, 3, 4의  $c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}, \alpha_i$ 의 값이 2, 5, 20, 0.6로 동일한 경우로 상대적으로 초기비용에 비해 수리·관리비용이 큰 경우.

case 3) 컴포넌트 1, 2, 3, 4의  $\alpha_i$ 은 0.6으로 모두 동일하나, 컴포넌트 1, 3의  $c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}$ 의 값은 10, 20, 0.5이며 컴포넌트 2, 4의  $c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}$ 의 값은 2, 5, 20인 경우.

case 4) 컴포넌트 1, 2, 3, 4의  $c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}$ 의 값이 2, 5, 20로 동일하지만,  $\alpha_i$ 값의 경우 컴포넌트 1은 0.01, 컴포넌트 2는 0.3, 컴포넌트 3은 0.6, 컴포넌트 4는 0.99로 다른 경우.

최적화를 위해 iSight 8.0<sup>9)</sup>을 사용하였으며, 최적화 방법은 Multi-island Genetic Algorithm(MIGA)을 선택하였다. 본 문제의 목적함수는 비선형이며 정수 형태의 설계변수를 가지고 있기 때문에, 수학적 최적화 방법을 사용할 경우 국소최소값에 빠질 수 있다. 따라서 Genetic Algorithm을 적합한 최적화 방법으로 선정하였다. Multi-island Genetic Algorithm은 일반적인 Genetic Algorithm에 비해 향상된 방법으로, 비교되는 가장 큰 특징은 생성한 모집단을 'island'라 불리는 집단군으로 나누는 것이다. 나누어진 집단군에서는 돌연변이와 교배 과정이 진행되며, 각 집단군 사이에서는 'migration'이 발생한다. migration은 발생하는 간격과 확률의 파라미터로 인해 작용한다. 본 연구에서는 25개의 집단군을 생성하고, 각 집단군에 25개의 모집단을 생성하였으며, 모집단 간의 교배율은 0.5, 돌연변이확률은 0.01, migration 간격은 5, migration 확률은 0.5로 최적화를 수행하였다.

#### 4.1 병렬 구조의 시스템에 적용

병렬 구조에서의  $i$  컴포넌트군을 구성하는 컴포넌트의 개수  $n_i$ 과 작동하는  $k_i$ 가 같다. 따라서  $k_i$ 를  $n_i$ 으로 대체하여 식 (1)에 적용하면, 병렬구조의 시스템에 적합한 비용함수는 식 (9)와 같다.

$$\underset{n, r}{\text{Minimize}} : C = \sum_{i=1}^n c_{1i}n_i + \sum_{i=1}^n c_{2i}n_i r_s(1-r_i) +$$

$$\sum_{i=1}^n c_{3i} n_i \exp\left( (1-\alpha_i) \frac{r_i - 0.8}{0.999 - r_i} \right)$$

Subject to:  $r_s \geq 0.95$ ,  
 $0.8 \leq r_i \leq 0.999$   
 $i = 1, 2, \dots, 4$  (9)

식 (9)를 적용한 4개의 case에 따른 최적화 문제의 결과는 Table 1과 같다. 최적화 후, 결과 신뢰도는 case1은 0.9511, case2는 0.9525, case3은 0.9523, case4는 0.9529로 목표 신뢰도 0.95를 모든 case가 만족하였다.

Table 1 Optimization result of parallel system for the 4 cases

	component 1		component 2		component 3		component 4	
	$r_1$	$n_1$	$r_2$	$n_2$	$r_3$	$n_3$	$r_4$	$n_4$
case1	0.9517	2	0.9585	1	0.9445	2	0.9511	2
case2	0.8813	2	0.8018	3	0.9046	3	0.8683	3
case3	0.9378	2	0.8465	2	0.9427	2	0.8671	2
case4	0.8228	3	0.8358	2	0.9162	2	0.9918	1

각 case별로 살펴보면 상대적으로 초기비용이 큰 case1의 경우 총 컴포넌트의 수는 7개이지만, 상대적으로 작은 초기비용을 가진 case2의 경우는 총 컴포넌트의 수는 11개이다. 또한 신뢰도의 경우 case1의 경우 4개의 컴포넌트군의 평균 신뢰도는 0.9515이며, case2의 평균 신뢰도는 0.8640이다. 이로부터 초기비용이 관리비용에 비해 상대적으로 큰 경우  $n_i$ 가 감소하고,  $r_i$ 가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 수리·관리비용이 초기비용에 비해 큰 경우는  $n_i$ 가 증가하며  $r_i$ 가 감소한다.

위와 같은 결과는 초기비용이 증가할수록 대기상태의 컴포넌트의 수를 감소시키며 상대적으로 관리비용에 많은 비용을 소요하는 것을 의미하는 것이다.

case3의 경우는 각 컴포넌트의  $n_i$ 는 동일한 값을 갖지만 관리비용이 큰 컴포넌트 2, 4는 컴포넌트 1, 3보다 낮은 신뢰도를 가지게 된다. 이는 초기비용과 수리, 관리비용의 상대적인 차이로 발생하는 결과이다.

그리고 case4에서는 관리비용의 관리용이성의 영향을 볼 수 있다. 가장 낮은 관리용이성을 갖고 있는 컴포넌트 1의 경우는  $n_1$ 은 3으로 가장 크며,  $r_1$ 은 0.8228로 가장 낮은 신뢰도를 보인다. 이와 반대로

가장 높은 관리용이성을 갖는 컴포넌트 4의 경우는  $n_4$ 은 1로 가장 작으며,  $r_4$ 은 0.9918로 가장 높은 신뢰도를 보인다. 이러한 결과는 관리용이성이 우수한 컴포넌트는 적은 비용으로 높은 신뢰도를 유지하는데 유리함이 있음을 나타낸다. 그러나 관리용이성이 작은 컴포넌트의 경우는 관리비용이 효율적이지 못하기 때문에  $r_i$ 을 감소시키며,  $n_i$ 를 증가시켜 목표 신뢰도에 도달하는 결과를 보인 것이다.

#### 4.2 대기 리던던트 구조의 시스템에 적용

대기 리던던트 구조란 구성요소 하나만을 사용 상태에 두고 이를 제외한 나머지 구성요소를 새로이 교체될 때까지 대기상태(redundancy)로 두는 리던던트 시스템이다.<sup>10)</sup>

대기 리던던트 구조의 시스템에 적용한 목적함수와 제한조건은 식 (10)과 같다. 구성요소 하나만을 사용하기 때문에 수리, 관리비용의  $k_i$ 는 무시된다.

$$\underset{r, n}{\text{Minimize}} : C = \sum_{i=1}^n c_{1i} n_i + \sum_{i=1}^n c_{2i} r_s (1 - r_i) + \sum_{i=1}^n c_{3i} \exp\left( (1-\alpha_i) \frac{r_i - 0.8}{0.999 - r_i} \right)$$

Subject to:  $r_s \geq 0.95$ ,  
 $0.8 \leq r_i \leq 0.999$   
 $i = 1, 2, \dots, 4$  (10)

각 case에 따른 결과를 Table 2에 나타내었다. 최적화 후, 시스템의 신뢰도는 case1은 0.9505, case2는 0.9500, case3은 0.9500, case4는 0.9506으로 목표 신뢰도 0.95를 모든 case가 만족하였다.

초기비용이 상대적으로 큰 case1의 경우  $n_i$ 는 감소하지만  $r_i$ 는 증가하는 결과를 확인할 수 있으며 case2의 경우는 반대이다. case3의 경우는 초기비용

Table 2 Optimization result of Redundant system for the 4 cases

	component 1		component 2		component 3		component 4	
	$r_1$	$n_1$	$r_2$	$n_2$	$r_3$	$n_3$	$r_4$	$n_4$
case1	0.9344	2	0.9352	2	0.9410	2	0.9619	1
case2	0.8028	3	0.8333	2	0.8043	3	0.8016	3
case3	0.9687	1	0.8009	3	0.9268	2	0.8161	3
case4	0.8005	3	0.8014	3	0.8201	2	0.9557	2



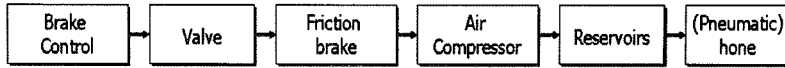


Fig. 5 Reliability block diagram of brake system

조로 구성된 시스템은 각 컴포넌트 중 하나라도 고장이 발생하면 제동성능 및 전동차 운행에 영향을 미치게 된다.

### 5.2 VVVF 전동차 제동장치 시스템 최적화

VVVF 전동차 제동장치에 적용하기 위해 문제에 적용한 상수  $c_{1i}$ ,  $c_{2i}$ ,  $c_{3i}$ ,  $\alpha_i$ 의 값을 정의해야 한다. 이를 위해 다년간의 VVVF 전동차의 유지보수 이력데이터 및 고장데이터를 이용하였다.

이를 바탕으로 Duane Method를 사용하여  $\alpha$  값을 산출하였으며,  $c_{1i}$ ,  $c_{2i}$ ,  $c_{3i}$ 은 가장 큰 비용을 10으로 설정하고, 0부터 10까지의 상대적인 값으로 나타내었다. VVVF 전동차 제동장치의 경우 Air Compressor의 관리비용이 가장 크기 때문에 10으로 설정하였다. 이를 적용한 컴포넌트의 비용계수와 관리용이성은 Table 4와 같다.

최적화를 위해 기존 브레이크 시스템의 직렬 구조에 적합하도록 목적함수의 수정이 필요하다.  $n_i$ 의 값이 모두 1이기 때문에 초기비용, 수리비용, 관리비용은  $r_i$ 의 변수로만 결정되게 된다. 직렬구조의 시스템의 최적화를 위한 목적함수와 제한조건은 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \underset{r}{\text{Minimize}} : C = & \sum_{i=1}^n c_{1i} + \sum_{i=1}^n c_{2i} r_s (1 - r_i) + \\
 & \sum_{i=1}^n c_{3i} \exp\left( (1 - \alpha_i) \frac{r_i - 0.8}{0.999 - r_i} \right) \\
 \text{Subject to: } & r_s \geq r_g, \\
 & 0.849 \leq r_i \leq 0.999 \\
 & i = 1, 2, \dots, 6
 \end{aligned} \tag{11}$$

$r_{i,max}$ 의 값은 신뢰도의 최대치인 0.999를 설정하였으며,  $r_{i,min}$ 은 VVVF 전동차 제동장치의 유지보수 이력데이터로부터 발생한 고장의 최소간격을 평균고장간격으로 간주하여, 식 (7)을 이용하여 계산한 결과 0.849로 설정하였으며, 모든 컴포넌트의 신뢰도 범위를 동일하게 선정하였다.

Table 4 Determining the constant value for application to brake system

	Brake Control	valve	Friction brake	Air Compressor	Reservoirs	(Pneumatic) hone
$c_{1i}$	6.07	2.91	3.73	4.66	0.89	0.63
$c_{2i}$	2.75	4.95	7.08	8.39	0.29	0.95
$c_{3i}$	0.43	2.41	1.14	10	5.94	4.04
$\alpha_i$	0.31	0.4	0.62	0.87	0.77	0.64

Table 5 Optimization result of present brake system ( $r_g=0.9$ )

	Brake Control	valve	Friction brake	Air Compressor	Reservoirs	(Pneumatic) hone
$r_i$	0.9731	0.9921	0.9818	0.9987	0.9822	0.9679
$r_s=0.900, C(\text{Total cost})=2196.69$						

목표 신뢰도( $r_s$ )를 0.9로 하였을 경우, 각 컴포넌트의 신뢰도 최적화의 결과를 Table 5에 나타내었다.

Air Compressor의 경우는 수리, 관리비용계수가 8.39, 10으로 가장 크기 때문에 가장 낮은 신뢰도로 예측된다. 그러나 관리용이성이 0.87로 가장 높기 때문에 가장 큰 신뢰도를 가지는 결과를 보였다. 반면에 가장 작은 관리비용계수를 가진 Brake Control의 경우는 관리용이성이 0.31로 가장 작아 두 번째로 낮은 신뢰도를 가짐을 볼 수 있다. 이는 직렬구조 시스템에서 목표 신뢰도를 만족하기 위한 각 컴포넌트가 0.95 이상의 높은 신뢰도를 갖기 때문에, 관리용이성이 크게 영향을 미친 결과이다.

다음은 현재의 VVVF 전동차 브레이크 시스템을 기존의 직렬구조가 아닌 병렬구조, 대기 리던던트 구조로 변환하여 고려한 비용함수를 적용한 시스템의 최적화 결과를 Table 6에 나타내었다. 병렬 시스템에 적용된 식 (9)와 대기 리던던트 시스템에 적용된 식 (10)을 이용하여 컴포넌트의 신뢰도 범위를 수정하여 시스템 최적화에 이용하였다. 이때 시스템의 목표신뢰도( $r_g$ )는 0.9로 직렬구조와 같다.

직렬구조, 병렬구조, 대기 리던던트 구조의 경우 모두 목표신뢰도 0.9를 만족하였다. 그러나 목적함

Table 6 Optimization result of redundant system ( $r_g=0.9$ )

■ $k_i = n_i$ (Parallel system)						
	Brake Control	valve	Friction brake	Air Compressor	Reservoirs	(Pneumatic) hone
$r_i$	0.9214	0.8782	0.8679	0.9770	0.8496	0.8541
$n_i$	2	2	2	1	2	3
$r_s=0.9158, C(\text{Total cost})=89.58$						
■ $k_i = 1$						
	Brake Control	valve	Friction brake	Air Compressor	Reservoirs	(Pneumatic) hone
$r_i$	0.9563	0.8602	0.8839	0.9989	0.8513	0.8520
$n_i$	1	2	2	1	2	3
$r_s=0.900, C(\text{Total cost})=58.26$						

Table 8 Optimization result of brake system at  $r_g=0.95$

☐ Series system						
	Brake Control	valve	Friction brake	Air Compressor	Reservoirs	(Pneumatic) hone
$r_i$	0.9932	0.9935	0.9847	0.9977	0.9901	0.9898
$r_s=0.900, C(\text{Total cost})=840993.94$						
☐ Redundant system						
■ $k_i = n_i$ (Parallel System)						
	Brake Control	valve	Friction brake	Air Compressor	Reservoirs	(Pneumatic) hone
$r_i$	0.9127	0.9234	0.9026	0.9988	0.8712	0.8648
$n_i$	2	2	2	1	2	3
$r_s=0.957, C(\text{Total cost})=97.76$						
■ $k_i = 1$						
	Brake Control	valve	Friction brake	Air Compressor	Reservoirs	(Pneumatic) hone
$r_i$	0.9351	0.8591	0.8789	0.9953	0.8513	0.8502
$n_i$	2	2	2	1	3	2
$r_s=0.952, C(\text{Total cost})=64.75$						

수인 총비용( $C$ )는 직렬구조일 경우  $C=2196.69$ , 병렬구조일 경우  $C=91.09$ , 대기 리던던트 구조일 경우  $C=58.26$ 으로 총비용에 많은 차이를 보인다.

이와 같은 결과는 시스템 구축을 위한 초기비용 면에서는 직렬구조를 가진 시스템이 적합하지만, 향후 시스템의 수리, 관리비용까지 고려할 때, 병렬, 대기 리던던트 구조와 같은 리던던트 구조가 비용적으로 직렬구조보다 더 적합함을 보여주는 것이다.

Table 8은 목표신뢰도를 0.95로 선정하였을 때의 총비용을 나타낸다. Table 7과 Table 8을 비교해 보면 목표신뢰도 값이 증가할수록 직렬구조와 리던던트 구조를 가진 시스템 간의 총비용의 차이는 더욱 증가됨을 알 수 있다.

따라서 VVVF 전동차 제동장치 시스템 경우 직렬 구조에서 리던던트 구조의 시스템으로 변화로 경제적인 이점을 가질 수 있음을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 비용의 관점에서 접근하여, 목표 신뢰도를 만족하는 시스템의 구조 및 이를 구성하는 컴포넌트의 신뢰도 할당의 최적화 방법론을 제시하였다.

이를 위해 일반적인 시스템의 비용함수를 구축하는 일이 선행되었다. 목적함수인 비용함수를 최소화하며, 각 컴포넌트의 목표 신뢰도와 신뢰도의 상·하한을 제한조건으로 하여 최적화 문제를 구성하였다. 이와 같이구성한 문제는 iSight 8.0를 이용해 비선형, 정수 변수의 문제 최적화에 적합한 Multi-island Genetic Algorithm 방법을 통해 최적화 하였다.

구성한 비용함수를 4가지 case에 적용하여, 비용함수의 특성과 적용 적합성을 확인한 후, VVVF 전동차 제동장치 시스템의 최적화에 도입하였다.

유지보수 이력 데이터를 이용하여 VVVF 전동차 제동장치 시스템 컴포넌트의 특성을 반영하는 각 비용계수와 관리비용의 값을 획득하였다. 이를 바탕으로 기존의 직렬구조를 지닌 시스템을 비용적으로 평가한 후, 제안한 리던던트 구조에 적용하여 비교 검토하였다. 결과적으로 VVVF 전동차 제동장치 시스템은 관리·수리비용의 비용이 크기 때문에, 비용적으로 직렬구조 보다 리던던트 구조의 시스템이 적합함을 확인할 수 있었다. 두 구조의 시스템유지의 총비용의 차이는 시스템의 목표신뢰도가 높아질수록 더 커지게 된다.

그러나 동일 기능을 가진 컴포넌트를 복수 개로 사용할 경우 중량, 용적 등이 증가하게 된다. 따라서 리던던트 구조의 적용에는 본 연구에서 제시한 비용적인 제한 조건 외에 전동차 전체 시스템의 비용, 질, 납기, 안전성 측면의 종합적인 판단이 요구된다.



이로써 본 연구는 시스템 설계 과정에서 최소의 비용으로 시스템을 설계할 수 있는 유용한 방법론을 제시하였다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R01-2004-000-10938-0)와 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수연구실 및 해외공동연구(KRF-2005-213-D00020) 지원사업의 연구결과입니다.

## References

- 1) P. Manolis and D. L. Nikos, "Reliability-based Structural Optimization using Neural Networks and Monte Carlo Simulation," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.191, No.32, pp.3491-3507, 2002.
- 2) L. Painton and J. Campbell, "Genetic Algorithms in Optimization of System Reliability," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.44, No.2, pp. 172-178, 1995.
- 3) H. J. Kim, C. H. Bae, J. H. Lee, T. Y. Koo and M. W. Suh, "Reliability Optimization of Urban Transit Brake System Using Hybrid Neuro-Genetic Technique," *Spring Conference Proceedings, KSAE*, Vol.4, pp.2013-2018, 2006.
- 4) H. Y. Lee, K. J. Park, T. K. Ahn, G. D. Kim, S. K. Yoon and S. I. Lee, "A Study on the RAMS for Maintenance CALS System for Urban Transit," *Korean Society for Railway*, Vol.6, No.2, pp.108-113, 2003.
- 5) W. Kuo, F. A. Tilmam and V. R. Prasad, "Optimal Reliability Design : Fundamental and Application," *Cambridge University Press*, pp.10-20, 2001.
- 6) R. C. Suich, "Reliability And Cost: Question For The Engineer," *Microelectron Reliab.*, Vol.37, No.2, pp.289-295, 1997.
- 7) M. Adamantios, "Reliability and Optimization for Complex Systems," *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp.216-221, 2000.
- 8) ReliaSoft, *Reliability Growth & Repairable Systems Data Analysis Reference*, ReliaSoft Publishing, pp.37-77, 2005.
- 9) Engineous Software, *iSIGHT Reference Guide*, Engineous Software North Carolina, USA, pp.116-178, 2003.
- 10) J. J. Kim and J. W. Back, *Reliability Engineering*, Korea National Open University Press, pp.49-76, 1994.
- 11) H. J. Kim, C. H. Bae, S. B. Kim, M. H. Kim and M. W. Suh, "A Study on the Development of Web-based Expert System for Urban Transit," *Transactions of KSAE*, Vol.13, No.5, pp.163-170, pp.50-74, 2005.
- 12) C. H. Bae, S. B. Kim, H. Y. Lee and M. W. Suh, "A Study on Development of the Reliability Evaluation System for VVVF Urban Transit," *Transactions of KSAE*, Vol.13, No.5, pp.7-18, 2005.