

최소 컷셋법에 의한 화력발전소 기동전원의 신뢰도 예측에 관한 연구

論 文
48A-4-2

A Study on the Reliability Evaluation of Start-up Power Supply in Fossil Power Plant by Minimal Cut-Set Method

崔圭植*
(Che, Gyu Shik)

Abstract - The auxiliary transformers or start-up/stand-by transformer(s) are installed against the start-up and shut-down of generator and emergency status in fossil power plant. The on-site power supply configuration using these transformers must be determined, considering configuration requirements, site characteristics, reliability and availability severely because it is remarkably important for safety and economy of plant.

The auxiliary or start-up/stand-by power supply configuration has been determined considering only safety requirements and construction cost until now in Korea.

This paper presents general theorems for the reliability estimation and proposes 2-unit based 4 alternatives for the start-up power supply system of 500MW standardized fossil power plant. The reliability and unavailability of equipment, system and configuration are determined using minimal cut-set methodology. The optimized plan of 4 alternatives is determined based on this ultimate reliability and unavailability.

key words : minimal cut-set, reliability, unavailability, auxiliary transformer, start-up transformer, on-site power supply

1. 서론

화력발전소에는 발전기의 기동, 정지, 운전 및 보수 등에 필요한 소내전원을 공급하기 위하여 소내보조변압기와 기동변압기 또는 소내대기변압기를 설치하여 운영하고 있다. 이러한 소내전원계통의 구성은 발전소의 경제성과 안전성면에서 중요한 문제이기 때문에 발전소 건설계획이 수립되면 소내보조변압기와 기동변압기의 대수 및 구성방식에 대하여 검토하게 된다. 기동전원계통은 발전소의 건설과 관련된 송전선로의 구성요건, 부지특성, 선행호기의 기동전원구성방법 등을 고려하여 구성되어야 하므로 지금까지는 비교적 부지특성에 적합한 소내전원계통을 연구하였다. 즉, 부지특성을 고려한 여러 가지 실현가능한 구성방식을 제시하여 단락전류와 전압강하의 입장에서 기술적인 문제점을 검토하고 그 다음에 초기투자비라 할 수 있는 건설공사비를 비교하여 최적안을 결정하였다.[1~6] 상기 연구에서 최적으로 제시된 안은 부지특성의 영향을 많이 받으므로 어느 발전소에도 공통적으로 적용되는 통일성 있는 결론이라 할 수 없으며, 소내전원계통의 이용률에 따른 발전대체비를 고려하지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 발전소의 소내전원구성이 전력계통에 미치는 영향을 최소화할 수 있도록 기동전원의 계통구성에 중점을 두고 소내보조변압기, 기동변압기 또는 소내대기변압기, 주요 고압소내모선 등의 신뢰도와 이 기기들이 시스템을 구성했을 경우의 이용률능도를 평가하여 발전소 소내전원의 적정구성방안을 연구한다.

연구방법으로서는 현재 우리 나라에서 운전중이거나 건설 중인 500MW급 표준화력발전소의 소내전원구성현황을 조사하여 각종 인허가요건, 기술기준 및 기술규격에 부합하는 각각의 가능한 대안을 제시한다. 각각의 안에 대해서 신뢰성과 이용률능도를 산출하고, 이 결과에 의해서 최적안을 선정한다.

2 장에서는 현재 우리 나라에서 건설중이거나 운전 중인 화력발전소 기동전원의 현황을 조사하여 우리 나라의 표준화력발전소를 감안한 기동전원으로서 채택 가능한 설계 대안을 제시한다. 3 장에서는 단위기나 시스템의 신뢰도를 평가할 수 있는 기법들을 기술하고 본 연구에서 채택하고자 하는 배전이용률능도의 평가법으로서 최소컷셋법을 실증적으로 소개한다. 4 장에서는 최소컷셋법을 이용하여 각 제시된 안에 대한 최소 컷셋을 구하고 배전이용률능도를 계산한다. 또한, 신뢰도와 배전이용률능도에 근거하여 최적안을 선정하고, 5 장에서 결론을 맺는다.

2. 소내전원의 구성방식

2.1 개요

우리 나라에 현재 설치·운전중에 있는 복합화력을 제외한 화력발전소에서 소내보조변압기와 기동/대기변압기의 설치현황을 보면 표 2.1에 요약되어 있는 바와 같이 소내보조변압기는 태안화력 1, 2호기를 제외한 모든 발전소에 발전기 1호기당 1대가 설치되어 있다. 기동변압기는 태안화력 1~4호기를 제외한 모든 발전소에 발전기 2호기당 1대를 설치하여 공유하고 있다. 6.9kV 소내부하 주모선은 소내보조변압기와 기동변압기의 대수와 관련이 있다. 삼천포화력 3, 4호기와 태안

* 正會員 : 建陽大 情報電子通信工學部 副教授
接受日字 : 1998年 9月 29日
最終完了 : 1999年 3月 9日

화력 3, 4호기에 발전기 1호기당 2개의 6.9kV 주모선이, 태안 화력 1,2호기에 발전기 1호기당 4개의 6.9kV 주모선이, 기타 발전소에 발전기 1호기당 3개의 6.9kV 주모선이 설치되어 있다. 태안화력 1,2호기와 삼천포화력 3,4호기에서 기동변압기의 저압측 단자는 양 호기의 6.9kV 주모선에 병렬로 접속되어 있으나, 기타 발전소에서는 기동변압기의 저압측 단자가 6.9kV 공용모선에 단일 접속되고 그 대신 6.9kV 소내부하모선이 상호 연계되어 있다. 또한 삼천포화력, 보령화력, 하동화력과 당진화력 등에서 발전기 호기간 6.9kV 모선을 연계하여 비상전원을 공급받을 수 있도록 구성되어 있다.

서인천복합화력 1~4단계에서는 발전기 차단기(GCB)가 설치되어 있어 기동변압기 또는 소내대기변압기가 설치되어 있지 않고 주변압기와 소내보조변압기를 통하여 기동전원을 공급받고 있다.

보령화력 3~6호기를 제외한 500MW급 화력발전소의 기동변압기의 고압측 정격전압은 154kV이다.

표 2.1 소내보조변압기 및 기동/대기변압기 설치현황표

Table 2.1 Installation status of auxiliary or start-up/stand-by transformer

구 분	소내보조	기동/대기	비 고	
보령 3,4호기	1기당 1대	2기당 1대		
보령 5,6호기	1기당 1대	2기당 1대		
삼천포 3,4호기	1기당 1대	2기당 1대		
삼천포 5,6호기	1기당 1대	2기당 1대		
태안 1,2호기	1기당 2대	2기당 2대		
태안 3,4호기	1기당 1대	1기당 1대		
하동 1,2호기	1기당 1대	2기당 1대		
당진 1,2호기	1기당 1대	2기당 1대		
서인천1,2단계	1기당 1대	없음		GCB 설치
서인천3,4단계	2기당 1대	없음		GCB 설치

(주) S/T : 증기터빈 (Steam Turbine)

상기 표에 의해 발전기 차단기가 없는 경우에 발전기 2호기당 1대의 기동변압기 또는 2대의 기동 변압기가 설치되는 구성, 발전기 차단기가 있는 경우에는 소내대기변압기가 없더라도 호기의 소내보조변압기를 통한 예비소의전원을 공급받는 소내전원 구성방식에 대해서 검토한다.

2.2 소내전원 구성방식 및 변압기 용량 선정

2.2.1 구성방식

본 검토에서는 2개 호기 500MW급의 표준형에 대해서 가능한 방안을 구성하고(표 2.2 참조) 이에 대한 신뢰도를 평가한다. 기동변압기의 1차측 전압은 154kV로 가정한다.

제1안은 발전기 차단기가 없이 소내보조변압기와 기동변압기를 발전기 1호기당 각각 1대씩 구성하여 호기별로 전용하는 방안이며, 적용 예로는 태안화력 3, 4 호기가 있다.(그림 2.1 참조) 제2안은 발전기 차단기가 없이 소내보조변압기를 발전기 1호기당 2대씩으로 하고 기동변압기를 발전기 2호기당 2대씩으로 하여 공용하는 방안이며, 적용 예로는 태안화력 1, 2호기가 있다.(그림 2.2 참조) 제3안은 발전기 차단기가 없이 소내보조변압기를 발전기 1호기당 1대씩으로 하고 기동

표 2.2 소내전원 구성 요약표

Table 2.2 Configuration summary of on-site power supply

구 분	소내보조	기동/대기	GCB
제1안	1호기당 1대	1호기당 1대	×
제2안	1호기당 2대	2호기당 2대	×
제3안	1호기당 1대	2호기당 1대	×
제4안	1호기당 2대	×	○

변압기를 발전기 2호기당 1대씩으로 하여 공용하는 방안이며, 적용 예로는 보령화력 3~6호기, 삼천포화력 3~6호기, 당진화력 1, 2호기, 하동화력 1,2호기가 있다.(그림 2.3 참조) 제4안은 발전기 차단기가 있고 소내보조변압기를 발전기 1호기당 2대씩으로 하며, 기동변압기나 소내대기변압기를 두지 않는 대신 타 발전기의 소내보조변압기를 통하여 예비소의전원을 확보하는 방안이며, 적용 예로는 서인천 복합화력 1~4단계가 있다.(그림 2.4 참조)

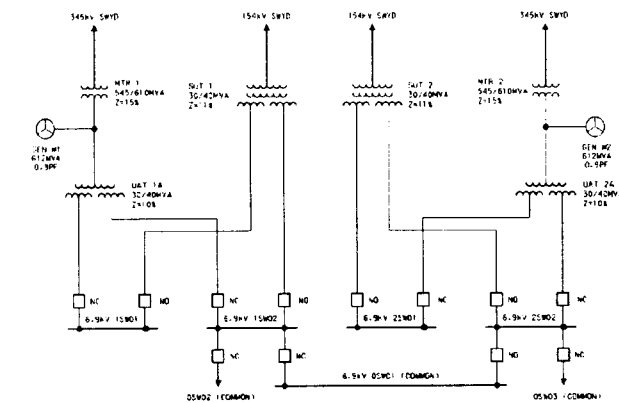


그림 2.1 제1안의 기동전원 구성도

Fig. 2.1 Schematic diagram of plan 1 start-up power supply

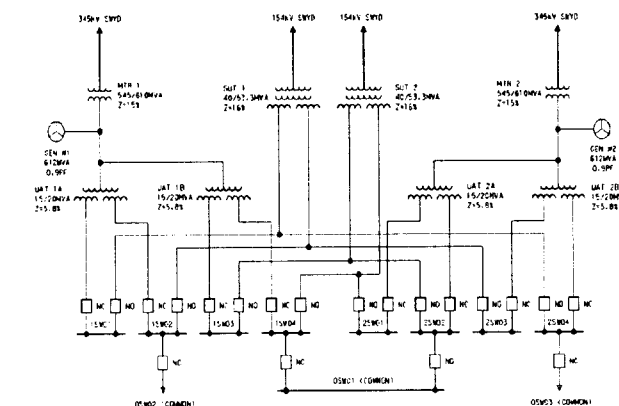


그림 2.2 제2안의 기동전원 구성도

Fig. 2.2 Schematic diagram of plan 2 start-up power supply

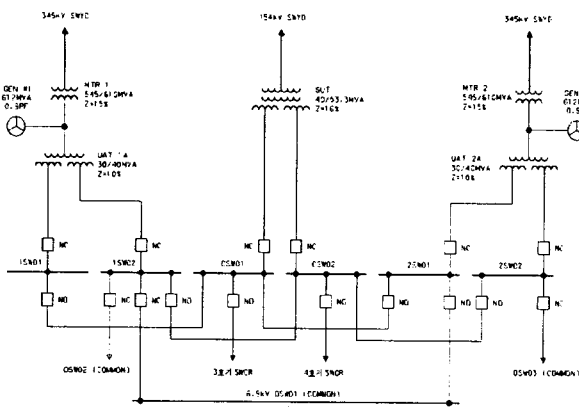


그림 2.3 제3안의 기동전원 구성도
 Fig. 2.3 Schematic diagram of plan 3 start-up power supply

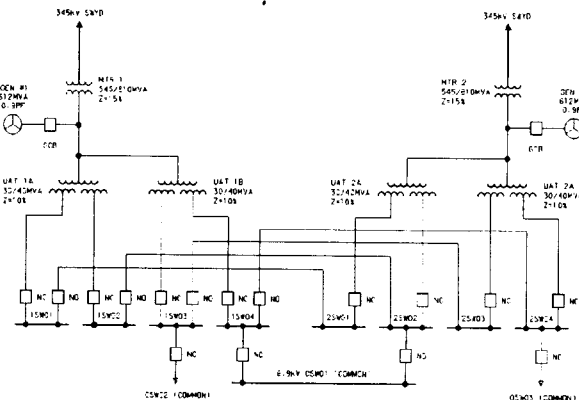


그림 2.4 제4안의 기동전원 구성도
 Fig. 2.4 Schematic diagram of plan 4 start-up power supply

2.2.2 변압기 용량 선정

최근에 설계, 건설되는 500MW급 발전소인 삼천포화력 5, 6호기를 기준으로 한다.

제1안의 소내보조변압기는 100% 정상운전시 소요되는 발전기 한 호기 분의 소내부하와 해당 공용 부하를 감당할 때의 최대부하를 FA, 55℃ 용량으로 선정한다. 기동변압기는 발전기 호기별로 설치되므로 소내보조변압기 용량과 동일하게 선정한다. 제2안의 소내보조변압기는 100% 정상운전시 소요되는 한 호기 분의 소내부하와 해당 공용부하를 감당할 때의 최대부하를 FA, 55℃ 용량으로 선정한다. 기동변압기는 한 호기 분의 전부하와 타 호기의 기동시 부하를 감당할 때의 최대부하를 FA, 55℃ 용량으로 선정한다. 제3안의 소내보조변압기는 100% 정상운전시 소요되는 한 호기 분의 소내부하와 해당 공용부하를 감당할 때의 최대부하를 FA, 55℃ 용량으로 선정한다. 기동변압기는 한 호기 분의 전부하와 타 호기의 기동시 부하를 감당할 때의 최대부하를 FA, 55℃ 용량으로 선정한다. 제4안의 소내보조변압기는 발전기 차단기

가 있고 기동변압기가 별도로 없기 때문에 100% 정상운전시 소요되는 한 호기의 소내부하 및 타 호기의 기동 및 소내부하를 감당할 때의 최대 부하를 FA, 55℃ 용량으로 선정한다. 기동변압기는 발전기 차단기를 개방하고 기동전원을 공급받기 때문에 필요하지 않다.

3. 신뢰도 평가 방법

3.1 고장간 평균시간(Mean Time Between Failure ; MTBF)

부품의 MTBF 또는 예상수명은 T의 평균치로 정의되며, R(t)를 부품의 신뢰도라 할 때 다음과 같이 표현할 수 있다.[7]

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t \frac{dR(t)}{dt} dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.1)$$

단, f(t)는 고장율의 밀도함수이다.

3.2 직렬시스템

직렬시스템은 구성 부품 어느 하나라도 고장을 일으키면 시스템이 고장나는 경우이다. 직렬시스템이라 해서 부품이 반드시 물리적으로 직렬일 필요는 없다. 예를 들면 자동차의 4개 바퀴에 있는 타이어는 그 중 하나라도 고장이 나면 차가 작동될 수 없으므로 신뢰도 계산에서 직렬이라 볼 수 있다. 직렬인 n개의 부품을 고려한다면, 그 부품들이 각각 독립적이라 가정하여 직렬시스템의 신뢰도 R_s를 구하면 다음과 같다.

$$R_s = R_1 R_2 \dots, R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3.2)$$

여기서, R_i는 부품의 신뢰도를 나타낸다.

3.2.1 직렬시스템의 고장율

i번째 부품의 고장시간이 상수 고장율 λ_i(i=1,2,...,n)를 가진 지수분포를 따른다면 신뢰도는 다음과 같이 표현된다.

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (3.3)$$

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \exp\left\{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right\} = e^{-\lambda_s t} \quad (3.4)$$

그러므로, 시스템의 고장시간도 각 부품의 고장율을 합해서 구해진 시스템의 고장율을 가진 지수분포를 따른다. 직렬시스템의 신뢰도는 다음과 같다.

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n \exp\left\{-\int_0^t h_i(x) dx\right\} = \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \int_0^t h_i(x) dx\right\} = \exp\left\{-\int_0^t \left(\sum_{i=1}^n h_i(x)\right) dx\right\} \quad (3.5)$$

단, h_i(x)는 구성품의 고장율이다.

3.2.2 직렬시스템의 MTBF

직렬시스템의 MTBF는 아래와 같이 계산한다.

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} \left(\prod_{i=1}^n R_i(t) \right) dt \quad (3.6)$$

부품의 고장율이 지수분포를 따른다면 식(3.6)은

$$MTBF = \int_0^{\infty} \exp \left\{ - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right) t \right\} dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3.7)$$

가 된다.

3.3 병렬시스템

병렬시스템은 모든 구성부품 전부가 고장날 때에만 시스템이 고장나는 경우이다. 병렬로 연결된 일련의 n 개 스위치 병렬시스템을 구성하는 것을 예로 들면, 모든 스위치가 고장이나야 시스템이 쓸모 없게 되어 전류가 한 쪽에서 다른 쪽으로 흐를 수 없게 된다.

n 개의 부품이 병렬로 연결되어 있으면 시스템의 신뢰도는 아래와 같이 표현된다.

$$R_p = 1 - P_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (3.8)$$

3.3.1 병렬시스템의 고장율

시스템의 고장율 $h_p(t)$ 는 아래와 같다.[7]

$$h_p(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\sum_{j=1}^n f_j(t) \prod_{i=1, i \neq j}^n F_i(t)}{1 - \prod_{i=1}^n F_i(t)} \quad (3.9)$$

여기서, $F(t)$ 는 시간 t 에서의 고장에 대한 분포함수이고, $f(t)$ 는 확률밀도함수이다.

즉, 시스템의 고장율 $h_p(t)$ 는 부품고장율의 합과 같지 않다는 것을 알 수 있다.

3.3.2 병렬시스템의 MTBF

n 개의 부품을 가진 병렬시스템을 생각해보기로 하자. i 번째 부품의 확률밀도함수가 고장율이 λ_i 인 지수분포라 하자. 그러면 시스템의 MTBF는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} MTBF &= \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} [1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))] dt \\ &= \int_0^{\infty} [1 - \prod_{i=1}^n \{1 - e^{-\lambda_i t}\}] dt \\ &= \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_n t})] dt \quad (3.10) \end{aligned}$$

3.4 직렬과 병렬이 혼합된 시스템

식(3.2)와 (3.8)로부터 직렬시스템의 신뢰도는 부품의 신뢰도보다 항상 낮고 병렬시스템의 신뢰도는 부품의 신뢰도보다

항상 높다는 것을 알 수 있다. 즉,

$$R_s < R_i, \quad R_p > R_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3.11)$$

이는 시스템의 신뢰도가 부품을 병렬로 연결하면 향상된다는 것을 의미한다.

3.5 복합시스템

시스템이 지금까지 검토하던 직렬 시스템보다 더 복잡한 구조를 가지고 있는 경우, 신뢰도를 결정하려면 이 외에 좀더 다른 기법이 필요하다. 그러한 시스템의 신뢰도를 구하는 여러 가지 가능한 방법들이 있다. 여기에서는 세 가지 즉, 열거(enumeration), 조건확률(conditional probability), 컷셋(cut-set) 기법에 대해서 고찰해보고자 한다. 이러한 기법 모두가 동일한 기본 개념을 사용하나, 세부 사항에서는 방법이 다르다. 이러한 방법은 직렬시스템에도 물론 적용 가능하다.

열거법의 기본은 시스템 각각의 부품이 운전조건일 수도 고장조건일 수도 있다는 것을 관찰하는 것이다. 시스템에 있는 각각 다른 부품에 대해서 모든 조건을 결합하여 고찰하여 여러 가능한 사상을 열거하는 것이다. 시스템을 완벽하게 운전하는 조건에 이르는 사상은 검사에 의해서 확인하며, 시스템의 신뢰도는 완벽한 시스템의 운전에 이르게 하는 모든 상호 독립사상을 구현시키는 확률을 발견하여 계산한다.

조건확률법에서는 시스템을 직렬시스템으로 분해시킬 수 없도록 하는 시스템의 주요부품 C_{crit} 을 확인하여 시스템의 신뢰도를 아래와 같이 계산한다.

$$\text{(시스템의 신뢰도)} = \text{(부품 } C_{crit} \text{가 운전중일 경우의 시스템 신뢰도)} + \text{(부품 } C_{crit} \text{가 운전중일 확률)} + \text{(부품 } C_{crit} \text{가 고장일 경우의 시스템 신뢰도)} + \text{(부품 } C_{crit} \text{가 고장일 확률)}$$

컷셋법[8][9][10][11]은 전에 검토하였던 열거법이나 조건확률법에 비하여 시스템의 신뢰도를 구하는 데 있어서 매우 유용한 방법이다. 컷셋법은 단순한 방법으로도 계산할 수 있고 컴퓨터를 실현하여 시스템의 여러 상이한 고장모드를 확인할 수도 있다.

컷셋법은 단순한 시스템이나 복잡한 시스템 모두에 유용하게 적용할 수 있으며, 특히 배전계통의 신뢰도를 평가하기에 적합한 기법이다. 컷셋은 “부품 하나만으로도 시스템의 고장을 일으킬 수 있는 부품의 셋”이며, 최소컷셋은 시스템의 고장을 일으키는 하부 셋이 없는 컷셋을 말한다. 최소컷셋의 부품은 모두 병렬이라 할 수 있는데, 이는 시스템이 고장나기 위해서는 모든 부품이 고장나야 하기 때문이다. 그리고, 여러 다양한 최소컷셋은 직렬이라 할 수 있는데, 이는 그 중 어느 하나의 최소 컷셋이 고장나도 시스템이 고장나기 때문이다. 일단 최소컷셋이 구해지면 해당 공식을 이용하여 신뢰도를 정할 수 있다. 부품 상호간이 독립적이라 가정하고 컷셋 C_i 에서의 부품고장확률을 $P(\overline{C}_i)$ 라 하면 n 개의 최소컷셋에 대한 시스템의 확률(이용불능도)과 빈도는 아래와 같다.

$$P_f = P(\overline{C}_1 \cup \overline{C}_2 \cup \overline{C}_3 \cup \dots \cup \overline{C}_n) \quad (3.12)$$

고장빈도는 아래와 같다.

$$f_f = P(\overline{C_1})W_1 + P(\overline{C_2})W_2 + \dots + P(\overline{C_n})W_n - [P(\overline{C_1} \cap \overline{C_2})W_{1,2} + P(\overline{C_1} \cap \overline{C_3})W_{1,3} + \dots + P(\overline{C_i} \cap \overline{C_j})W_{i,j}], \dots (-1)^{n-1} P(\overline{C_1} \cap \overline{C_2} \cap \dots \cap \overline{C_n})W_{1,2,\dots,n} \quad (3.13)$$

여기서, $W_{i,j} = \sum_{k \in C_i \cup C_j} \mu_k$ 이고, 평균고장시간은 $d_f = P_f / f_f$ 이다.

부품의 MTBF가 MTTR보다 상당히 크면(달리 말해 부품의 이용률이 1에 가까움), 식(3.12)와 (3.13)은 아래와 같이 단순화된다.

$$P_f = \sum_{i=1}^n P(\overline{C_i}) = \sum_{i=1}^n P_{CS_i} \quad (3.14)$$

$$f_f = \sum_{i=1}^n P(\overline{C_i})W_i = \sum_{i=1}^n f_{CS_i} \quad (3.15)$$

여기서, P_{CS_i} 와 f_{CS_i} 은 각각 컷셋사상 i 의 확률과 빈도이다.

3.6 이용률 및 이용률능도

이용률이라는 말은 $t=0$ 인 시각에 동작중인 기기나 시스템이 어떤 시각 t 에서 동작조건에 있을 확률을 지시하는 것을 말하며, 엄격하게 말하면 가동율이라고 해야 할 것이다.

시각 t 에서 동작조건에 있기 위해서는 기기나 시스템이 고장상태이면 안되며, 고장 나 있었다면 반드시 수리된 상태로 있어야 한다. 따라서, 이용률이란 신뢰성과 보수성 모두를 포함하는 의미가 된다. 이용률에는 목적하는 바에 따라 순간 이용률, 평균운전이용률, 정상상태이용률, 고유이용률, 취득이용률, 운전이용률이 있으나[7], 플랜트의 이용률을 산정할 때는 일반적으로 고유이용률을 적용한다.

발전소와 같이 기기나 부품의 신뢰도가 높은 경우에는 이용률과 동일개념인 이용률능도를 구하는 것이 여러 가지로 유리하기 때문에 본 연구에서는 이용률보다 이용률능도를 구하기로 한다. 이용률능도를 \overline{A} 라 할 때 이용률과 이용률능도의 관계는 다음과 같다.

$$\overline{A} = 1 - A \quad (3.16)$$

3.7 신뢰도 평가기법 제안

상기 3.5에서 제시한 컷셋법은 산업플랜트나 상업용빌딩의 전력계통에 적용해본 결과 전력배전계통에는 가장 적절하게 적용할 수 있는 기법으로 평가되고 있다. 이 기법은 체계적이고 직접적이어서 수동으로 또는 컴퓨터를 이용하여 어떠한 방법으로도 계산이 가능하다. 이 기법에서 중요하게 생각해야 할 부분은 계량적으로나 비계량적으로나 시스템의 취약점을 쉽게 찾아낼 수 있기 때문에, 시스템의 이용률능도에 가장 큰 영향을 미치는 부분에 초점을 맞추어 설계할 수 있다는 것이다. 따라서, 본 논문에서 시스템의 신뢰도와 이용률을 평가하는데 상기 최소컷셋법을 이용한다.

4. 화력발전소 기동전원의 신뢰도 평가

4.1 고장모드별 이용률능도

제시된 4개의 안에 대해서 각각의 부품이나 기기별로 고장과 고장시간을 구하여 평균이용률능도를 구해보면 표 4.1과 같다.

여기서, 고장과 고장시간에 대한 데이터는 주로 참고문헌 [12]의 데이터를 인용하였다.

표 4.1 기기별 평균 이용률능도

Table 4.1 Mean availabilities

고장모드	고장율 ^(a)	고장 ^(b)	\overline{A} (a)×(b)
소외전원 고장	1.00E-005회/h	4	4.00E-005
주발전기 고장	1.80E-007회/h	36	6.48E-006
주변압기 고장	2.40E-007회/h	36	8.64E-006
기동/대기변압기	1.03E-006회/h	36	3.71E-005
소내보조변압기	3.40E-007회/h	36	1.22E-005
발전기차단기	8.39E-004회/d	10	8.39E-004회/d
차단기 투입 실패	3.01E-004회/d	12	3.01E-004회/d
차단기 차단 실패	8.39E-004회/d	12	8.39E-004회/d
차단기 우발개방[8]	1.80E-006회/h	12	2.16E-005
345kV케이블고장[8]	2.15E-006회/h	16	3.44E-005
154kV케이블고장[8]	2.15E-006회/h	16	3.44E-005
6.9kV케이블고장	8.80E-006회/h	8	7.04E-005
상분리모선고장[8]	1.64E-006회/h	9.5	1.56E-005
NSPB고장[13]	4.98E-007회/h	24	1.20E-005
모선사고[8]	1.94E-007회/h	26.8	5.20E-006

4.2 데이터 베이스의 작성

그림 2.1 ~ 2.4와 표 4.1을 이용하여 데이터 베이스 파일을 작성하여 이용률능도를 계산하기 위한 자료로 사용한다.

4.3 소내부하 모선에서의 최소 컷셋

발전기 정지 중 기동전원을 공급받지 못하는 배전이용률능에 관한 최소단절집합을 분석하여 그 결과를 표 4.2 ~ 4.5에 나타내었다. 표 4.3의 순위 3을 예로 들면 최소단절집합의 이용률능도는 $EOGBO0001 \times EMCBC0004 = 8.39E - 004 \times 3.01E - 004 = 2.5254E - 007$ 와 같이 계산되고, 정점케이트 GF4-112 즉 6.9kV 모선에서의 이용률능도는 $4.616E - 005$ 이다. 표에서 최소컷셋으로 표현된 사상, 예를 들어 EMCBC0002는 차단기 02가 투입실패할 확률이고, EOSY0001은 기동변압기 01이 동작실패할 확률을 의미한다.

표 4.2 6.9kV 모선의 최소컷셋(제 1 안 기동전원)

Table 4.2 Minimal cut-set of 6.9kV bus(plan 1)

순위	이용률능도	최소컷셋	비고
1	3.010E-004	EMCBC0002	소외전원 상실
2	7.040E-005	EMCAY0002	
3	7.040E-005	EMCAY0002	
4	4.000E-005	LOOP	
5	3.710E-005	EOXS0001	
6	3.440E-005	EOCAY154-1	
7	2.160E-005	EMCBI0002	
계	5.801E-004		

표 4.3 6.9kV 모선의 최소컷셋(제 2 안 기동전원)

Table 4.3 Minimal cut-set of 6.9kV bus(plan 2)

순위	이용불능도	최소컷셋	비고
1	3.010E-004	EMCBC0004	소외전원 상실
2	7.040E-005	EMCAY0002	
3	7.040E-005	EMCAY0013	
4	7.040E-005	EMCAY0004	
5	7.040E-005	EMCAY0015	
6	4.000E-005	LOOP	
7	3.710E-005	EOXSAY0001	
8	3.440E-005	EOCAY154-1	
9	2.160E-005	EMCBI0004	
계	7.209E-004		

표 4.4 6.9kV 모선의 최소컷셋(제 3 안 기동전원)

Table 4.4 Minimal cut-set of 6.9kV bus(plan 3)

순위	이용불능도	최소컷셋	비고
1	3.010E-004	EMCBC0002	소외전원 상실
2	3.010E-004	EMCBC0002	
3	7.040E-005	EMCAY0007	
4	7.040E-005	EMCAY0005	
5	7.040E-005	EMCAY0006	
6	7.040E-005	EOCAY0002	
7	4.000E-005	LOOP	
8	3.710E-005	EOXSAY0001	
9	3.440E-005	EOCAY154-1	
10	2.160E-005	EMCBI0002	
11	2.160E-005	EMCBI0005	
계	1.049E-003		

표 4.5 6.9kV 모선의 최소컷셋(제 4 안 기동전원)

Table 4.5 Minimal cut-set of 6.9kV bus(plan 4)

순위	이용불능도	최소컷셋	비고
1	4.0000E-005	LOOP	소외전원 상실
2	5.2000E-006	EMBSY1SW02	
3	2.5254E-007	EOGBO0001 EMCBC0004	
계	4.6160E-005		

4.4 배전이용불능도 계산결과

발전소 소내부하모선이 발전기 정상운전시, 기동운전시 및 소내보조변압기 사고 중에 전력을 공급받지 못할 확률 즉 배전이용불능도의 계산결과를 표 4.6에 나타내었다.

정상운전시 소내부하모선은 소내보조변압기로부터 전력을 공급받고 주발전기 및 소내보조변압기의 평균고장율이 기동변압기보다 낮기 때문에 기동 변압기계통이 구성방안에 크게 영향을 받지 않아 배전이용불능도가 4.5×10^{-5} 정도로 큰 차이가 없으나 기동운전시에는 기동전원을 기동변압기 계통으로부터만 공급받으므로 기동변압기 계통의 구성에 관한 영향을 많이 받는다. 따라서 발전기 차단기를 설치한 제 4 안의 배전이용불능도가 4.65×10^{-5} 으로 가장 낮고 2대의 발전기에 1대의 기동변압기를 구성하는 제 3 안의 배전이용불능도가 1.05×10^{-3} 으로 가장 높다. 소내보조변압기 사고 중 6.9kV 모선 2개가 전원상실될 확률은 발전기 2개 호기당 2대의 기동변압기를 공유하는 제 2 안이 4.05×10^{-5} 으로 가장 낮고 나머지 3개 안은 2.5×10^{-4} 정도로 대동소이하다.

발전소의 소내부하모선이 소외전원을 수전하지 못할 확률 즉, 배전이용불능도는 설비가 간단할수록 높을 수밖에 없는 현상으로서 발전기 2개 호기당 1개의 기동변압기를 설치하는 제 3 안의 이용불능도가 가장 높은 반면, 발전기 차단기를 설치하여 소내보조변압기를 기동용으로 사용하고 사고시 타 호기의 소내보조변압기로부터 비상소외전원을 공급받는 제 4 안의 이용불능도가 가장 낮다. 즉, 제 4 안의 이용율이 가장 높고 제 3 안의 이용율이 가장 낮다. 이는 동일한 신뢰도를 가지는 기기나 부품을 사용해도 시스템을 어떻게 구성하느냐에 따라 시스템의 이용율에 큰 차이가 있음을 말해준다.

표 4.6 배전이용불능도

Table 4.6 Unavailabilities

구분	정상운전시 ^㉑	기동운전시 ^㉒	보조변압기 사고중	
			1개모선 ^㉓	2개모선 ^㉔
제1안	4.53E-005	5.80E-004	5.80E-004	2.52E-004
제2안	4.55E-005	7.21E-004	7.21E-004	4.05E-005
제3안	4.54E-005	1.05E-003	1.05E-003	2.53E-004
제4안	4.55E-005	4.62E-005	8.30E-004	2.64E-004

5. 결론

본 연구에서는 발전소의 소내전원구성이 전력계통에 미치는 영향을 최소화할 수 있도록 기동전원의 계통구성에 중점을 두고 소내보조변압기, 기동변압기 또는 소내대기변압기, 주요 고압소내모선 등의 신뢰도와 이 기기들이 시스템을 구성했을 경우의 이용불능도를 평가하여 발전소 소내전원의 적정구성방안을 연구하도록 하였다.

우리 나라에서 운전중이거나 건설중인 500MW급 표준화력발전소의 소내전원구성현황을 조사하여 각종 인허가요건, 기술기준 및 기술규격에 부합하는 각각의 가능한 대안을 제시하였으며, 각각의 안에 대해서 신뢰성과 이용불능도를 산출하고, 이 결과에 의해서 최적안을 선정하도록 하였다. 현재 우리 나라에서 건설중이거나 운전중인 화력발전소 기동전원의 현황을 조사하여 우리 나라의 표준화력발전소를 감안한 기동전원으로서 채택 가능한 설계 대안을 제시하였다. 단위기기나 시스템의 신뢰도를 평가할 수 있는 기법들을 기술하고 본 연구에서 채택하고자 하는 배전이용불능도의 평가법으로서 최소컷셋법을 실증적으로 소개하고, 최소컷셋법을 이용하여 각 제시된 안에 대한 최소 컷셋을 구하고 배전이용불능도를 계산하였다.

기술적인 면에서 보면 각각의 구성방식이 발전기의 기동에 필요한 소외전원을 공급할 수 있으며, 전압강하 및 단락전류요건을 만족하고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음 (96-03).

참 고 문 헌

1. 한국전력기술(주), “보령화력 3, 4호기 용량 및 대수 검토 보고서”, 한국전력기술(주), 1986. 7.
2. 한국전력기술(주), “보령화력 5, 6호기 용량 및 대수 검토 보고서”, 한국전력기술(주), 1988. 6.
3. 한국전력기술(주), “삼천포화력 5, 6호기 용량 및 대수 검토 보고서”, 한국전력기술(주), 1988. 7.
4. 한국전력기술(주), “태안화력 1, 2호기 용량 및 대수 검토 보고서”, 한국전력기술(주), 1990. 4
5. 한국전력기술(주), “당진화력 1, 2호기 용량 및 대수 검토 보고서”, 한국전력기술(주), 1992.11
6. 한국전력기술(주), “서인천화력 1, 2단계 용량 및 대수 검토 보고서”, 한국전력기술(주), 1991. 7.
7. Singiresu S. Rao, “ Reliability-Based Design “, McGraw-Hill, Inc., pp149-187, 1992
8. IEEE493, “ IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”, IEEE, pp141-151, 1990
9. ANSI/IEEE352, “IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety Systems”, IEEE, pp55,1987
10. 이치우, 김선진, 이성우, 정상영, “ 신뢰성공학”, 원창출판사, pp205-209, 1993.8
11. 강인선, 김진규, “신뢰성공학”, 한울출판사, 1997
12. 한국전력기술(주), “발전소 정전방지 검토”, 한전기술(주), pp113-163, 1987. 8
13. 한국전력기술(주), “원자력발전소 표준화 설계를 위한 조사 용역 제 10권”. 한전기술(주), 1988.6

저 자 소 개



최규식(崔圭植)

1948년 12월 29일생. 1976년 2월 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1983년 6월 뉴욕공과대학 전기과 졸업(석사). 1993년 2월 명지대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1978.2-1993.2 한국전력기술(주) 연구소 책임연구원. 현재 건양대학교 교수

Tel : (0461) 730-5283

E-mail : che@kytis.konyang.ac.kr