

원자력발전소 영구정지 시 소내전력공급계통 운영방안

An Operating Strategy of In-house Power Supply Systems in the Permanent Shutdown Nuclear Power Plant

임희택* · 이광대* · 전당희* · 윤종현* · 주익덕*

(Hee-Taek Lim · Kwang-Dae Lee · Dang-Hee Jeon · Jong-Hyun Youn · Ik-Deok Joo)

Abstract - Spent fuel is moved from the reactor into the spent fuel pool when nuclear power plant permanently shutdown. The sole function of a permanently defueled facility is to store spent fuel in a quiescent state. The function of electric system and loads are reduced. It is necessary to establish an operating strategy of electric system in the permanent shutdown nuclear plant. This paper reviews required loads and design criteria considering transition to permanent shutdown. An operating strategy of onsite electric system is proposed considering decommissioning strategy and stage of defueled condition.

Key Words : Electric system of NPP, Permanent shutdown

1. 서론

우리나라의 첫 원자력발전소인 고리1호기는 2017년 6월 18일 운영하가가 종료됨에 따라 영구정지 되었다. 원자력발전소가 영구정지 되면 원자로에서 모든 연료가 인출되고 사용후연료저장조에 저장되어 더 이상 원자로에 연료가 존재하지 않는다. 따라서 영구정지 이후에는 가동원전에서 고려하였던 설계기준사고인 냉각재상실사고, 증기발생기 전열관파열사고 등은 더 이상 고려대상이 아니므로 이를 위한 안전설비들은 그 기능을 수행하지 않아 전력공급이 필요치 않다. 그러나 영구정지 이후에도 사용후연료 저장조의 안전관리는 여전히 필요하다. 따라서 사용후연료저장조 냉각기능 및 발전소 유지관리, 방사선감시 등에 필요한 전력은 여전히 공급되어야 한다.

가동원전의 전력계통은 정상운전 뿐만 아니라 사고 시에도 안전관련 설비에 전력을 공급할 수 있도록 충분한 용량과 독립성, 다중성을 갖추어 설계되었다. 영구정지 이후 시간경과에 따라 사용후연료의 붕괴열은 계속 감소하고 냉각재상실사고 등 설계기준 사고를 위한 안전설비들이 더 이상 그 기능을 수행하지 않으므로 전력계통의 구성 및 운영을 최적화 하여 전기요금 및 운영비용을 줄일 필요가 있다.

원자력발전소 영구정지 시 소내전력계통의 운영방안을 결정하기 위해서는 영구정지 이후에도 전력공급이 필요한 부하에 대한 분석, 사용후연료의 영구인출을 고려한 사고해석 및 전력계통의 설계요건 분석이 필요하다.

원자력발전소 영구정지 시 전력계통 운영방향에 큰 영향을 미치는 또 하나의 요소는 중간저장시설로의 사용후연료 이동시점 및 해체전략이다. 중간저장시설로의 사용후연료 이동전에는 사용후연료 냉각계통과 이를 위한 보조계통들에 전력공급이 필요하지만, 사용후연료를 중간저장시설로 이동 후에는 대부분의 계통에 전력공급이 필요하지 않다.

원자력발전소의 해체전략으로는 일반적으로 즉시해체와 지연해체로 나눌 수 있다. 즉시해체의 경우 사용후연료저장조 냉각 및 해체에 필요한 전원공급을 위해 전력계통의 설계변경을 고려할 수 있다. 지연해체의 경우에는 해체 전까지 안전한 상태로 유지하기 때문에, 유지보수 및 모니터링을 위한 전원이 장기간 필요하다. 따라서 발전소 운영비용 및 설계변경 비용 등을 고려하여 전력계통의 운영방안을 수립할 필요가 있다.

우리나라는 1978년 고리1호기를 시작으로 현재 20기 이상이 운영되고 있다. 30 혹은 40년의 설계수명 종료 후 계속운전을 하지 않는다고 가정하면 2030년까지 12호기의 발전소가 영구정지 된다. 영구정지 이후에는 발전소 전력계통의 최적운영을 통한 효율화가 필요하다.

본 논문에서는 영구정지 이후에 필요한 계통 및 설비의 분석을 통해 전력공급이 필요한 부하를 도출하고, 영구정지 이후의 사고해석결과 및 설계요건을 분석하였다. 이를 기반으로 해체전략을 고려한 전력계통 운영방안 결정방법을 제안한다.

2. 영구정지 후 소요부하 및 설계요건 분석

영구정지 이후에는 전력공급이 필요한 부하가 달라지며, 사고해석 및 원자력안전법 등 법적 요건에 따라 설계요건이 변경된다. 본 장에서는 영구정지 이후 전력계통의 부하 및 설계요건 도

* Corresponding Author : Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power, Korea.

E-mail: heetaek.lim@khnp.co.kr

* Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power, Korea.
Received : July 31, 2017; Accepted : January 15, 2018

출방법을 기술하였다.

2.1 영구정지 시 소요부하 분석

원자력발전소의 전력계통은 발전소 운전 및 안전에 필요한 다양한 부하에 전원을 공급하도록 설계되었다. 각 발전소에 따라 다르지만 일반적으로 대형전동기에 전원을 공급하는 13.8kV 및 4.16kV 모선, 480 Load Center, 480V Motor Control Center와 계측제어전원에 전원공급을 위한 220V 교류전원계통 및 120V 직류전원계통으로 구성되어 있다.

영구정지 이후의 소요부하 분석을 위해서는 영구정지 시에도 기능을 수행하는 부하를 도출해내는 것이 필요하다. 영구정지 시 해당기능 수행여부의 결정을 위해서 아래의 기준을 수립하였다.

- 기준 1: 사용후연료 안전 저장
- 기준 2: 방사선안전
- 기준 3: 동력공급
- 기준 4: 작업환경 및 화재방호
- 기준 5: 감시 및 제어
- 기준 6: 기타보조계통(가스공급 용수 및 위생 등)

상기의 기준을 바탕으로 가압경수로형 원전의 운전 필요계통을 선정한 결과는 표 1과 같다.

각 계통은 하나 이상의 기능을 수행하므로, 계통의 기능분석 및 P&ID 등 도면검토를 통해 운전필요 기기를 선별하고 해당기기가 전원을 수전 받는 전력설비의 분석을 통해서 영구정지 이후의 전력계통 구성 및 소요부하를 분석할 수 있다. 고리1호기의

표 1 운전필요계통 선정 결과

Table 1 System categorization results

기준	운전 필요 계통
기준1	·사용후연료저장조 냉각/정화계통 ·재장전수저장탱크 및 가열계통 ·기기냉각수계통, 기기냉각수해수계통 ·연료취급계통
기준2	·소내방사선감시계통 ·액체/기체/고체 폐기물처리계통 ·15gpm 폐액증발기계통 ·기기 및 바닥 배수계통
기준3	·소외 및 소내전력계통 ·디젤발전기계통 ·공기압축계통
기준4	·보조증기계통, 냉방수계통 ·제어건물 및 보조건물 환기계통 ·격납건물 배기 공급 및 배출계통 ·화재방호계통
기준5	·주제어반, 통신계통 ·지진감시계통
기준6	·질소공급계통, 1차보충수 계통 ·탈염수계통, 조명계통

경우 소요부하가 다양한 위치에 산재해 있어 영구정지 초기에는 대부분의 모선이 부하에 전원을 공급하는 것으로 분석되었다.

2.2 영구정지 시 설계요건 분석

원자력발전소 전력계통은 냉각재상실사고, 증기발생기 전열관 파열사고 등 가상의 설계기준사고를 고려하여 설계되었다. 그러나 영구정지 이후에는 대부분의 설계기준사고는 더 이상 적용되지 않는다. 영구정지 이후에는 사용후연료저장조의 안전에 초점이 맞추어 지므로, 사용후연료저장조에서 일어날 수 있는 사고인 사용후연료저장조 냉각기능 상실사고, 사용후연료저장조 재고량 상실사고와 기존의 설계기준사고 중 하나였던 핵연료 취급사고를 고려할 수 있다.

사용후연료저장조 냉각기능 상실사고와 재고량 상실사고는 모두 사용후연료저장조 수위가 낮아지는 사고이다. 사용후연료저장조의 수위가 연료상단 아래로 감소하여 연료가 노출되면 봉괴열 제거능력이 상실될 수 있다. 따라서 사용후연료저장조 수위가 방사선 차폐를 위해 요구되는 최소 수위까지 도달하는 시간을 계산하여 냉각재 보충을 위한 조치 여유시간이 얼마나 존재하는지가 중요한 요소이다.

사용후연료저장조의 냉각기능 상실사고 혹은 재고량 상실사고 발생 시 냉각기능을 복구하거나 소내 또는 소외의 보충수를 공급함으로써 사고는 종결된다. 이를 위한 여유시간은 사용후연료의 봉괴열이 시간 경과에 따라 지속적으로 감소하기 때문에 지속적으로 늘어난다. 미국원자력규제위원회는 영구정지 후 시간경과에 따른 여유시간을 아래 표2와 같이 분석하였다.[1]

표 2 연료상단 3피트 까지 사용후연료저장조 재고량이 감소하는데 걸리는 시간

Table 2 Time to Heatup and Boiloff SFP Inventory Down to 3 Feet Above Top of Fuel

영구정지 후 기간	여유시간(PWR)
60일	100시간
1년	195시간
2년	272시간
5년	400시간

표 2의 여유시간은 가압경수로형 원전의 대표적인 발전소 분석결과로서 사용후연료저장조의 설계에 따라 달라질 수 있으나 대략적인 여유시간으로서 참조가능하다.

핵연료 취급사고는 사용후연료 취급도중 하나의 사용후연료 집합체가 낙하하는 사고이다. 사고로 인해 사용후연료 집합체의 연료봉이 손상되고 모든 껍방사능이 방출되는 상황을 가정한다. 사용후연료 취급사고의 방사능 영향은 제한구역경계 및 저인구지역 외곽경계지점에 위치한 개인에 대한 전신선량과 갑상선량을 평가하며 허용기준은 전신선량과 갑상선선량이 10CFR100의 제한치의 25% 이내이다.

영구정지 이후 핵연료 취급사고 시에는 주제어실 거주성 또한

고려해야 한다. 즉 핵연료 취급사고 시 주제어실의 선량이 10CFR100의 제한치 내에 있음을 확인한다. 2015년 5월 7일 영구 정지한 가압경수로형 원전인 Kewaunee Power Station은 영구정지 후 90일 시점에서 핵연료 취급사고에 대한 사고해석 결과 전력공급이 필요한 모든 공기조화계통의 작동 없이도 허용기준을 만족하는 것으로 분석되었다[2].

상기의 영구정지 시 안전해석 결과에서 알 수 있듯이 영구정지 이후에는 설계기준사고 시에도 전력이 필요한 설비의 작동 없이도 허용기준을 만족한다. 또한 붕괴열의 감소에 따라 사용후연료저장조의 냉각기능 상실 시에도 여유시간이 증가하므로 이에 따라 가동원전에 적용되었던 설계요건(그림 1)에 대한 분석을 통해 적용 유무를 판단할 필요가 있다.

가동원전 전력계통의 설계요건은 일반설계기준인 10CFR 50 APPENDIX A[3], GDC(General Design Criteria) 17, 18을 기초로 해서 그림 1과 같이 다양한 설계요건들이 존재한다. 해당 설

계요건들의 적용유무는 영구정지 후 단계에 따라서 구분될 수 있으며, 전력계통 설계요건에 영향을 미치는 단계를 그림 2와 같이 구분하였다.

영구정지 이후에는 기존 가동원전 전력계통의 설계요건으로 적용되었던 냉각재 상실사고 후 수초 이내 전력공급 등 설계기준 사고 시 긴급 전력공급에 대한 설계요건은 더 이상 적용이 불필요하다. 또한 설계기준사고 시 가혹한 환경에 노출되는 기기가 없으므로 내환경검증과 관련된 요건 역시 적용이 불필요하다.



그림 2 영구정지 후 진행과정
Fig. 2 Process after Permanent Shutdown

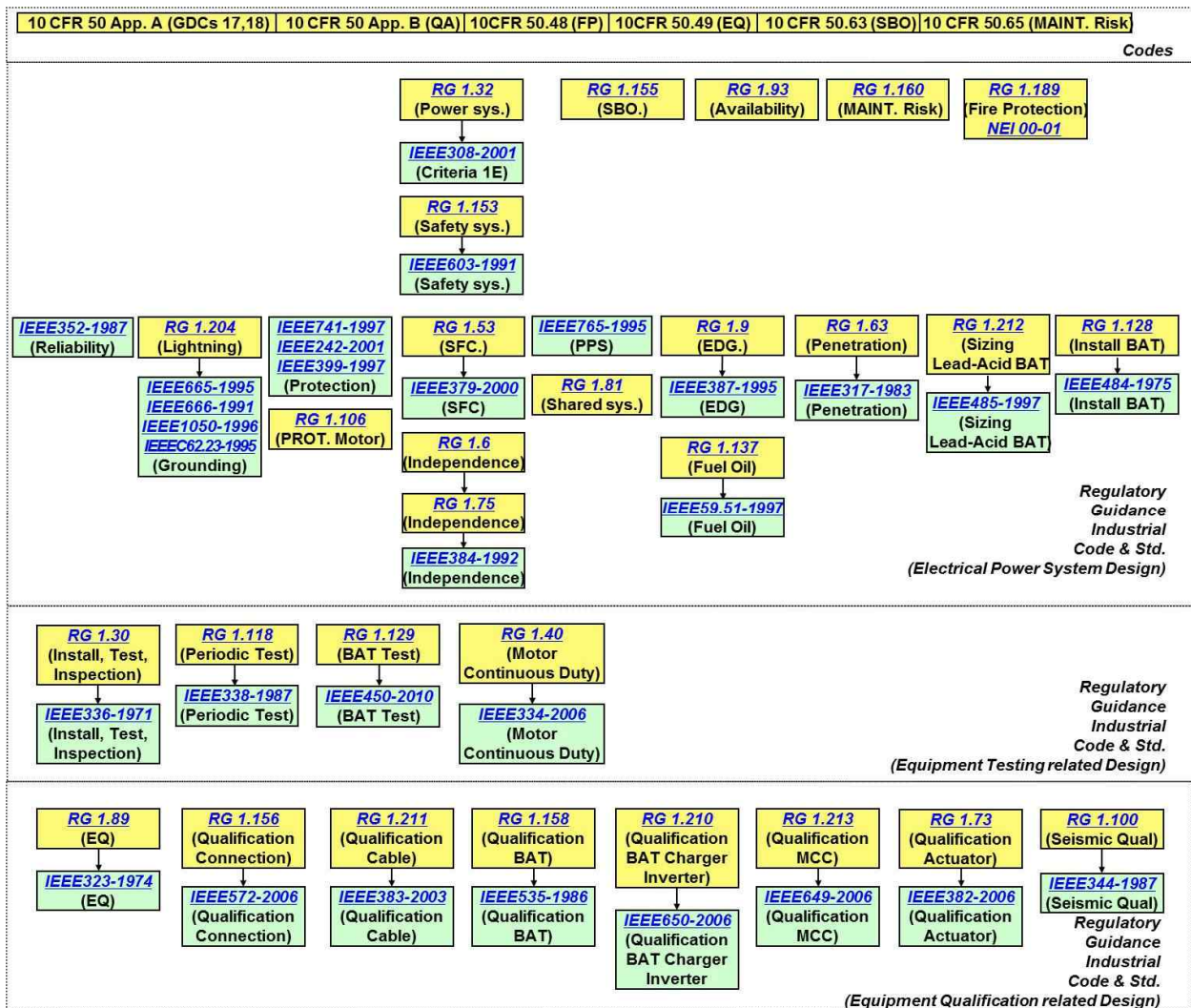


그림 1 원전 전력계통의 설계요건
Fig. 1 Design Criteria of electric system of NPP

영구정지 이후 설계기준사고 해석 결과 전력공급 없이도 허용 기준을 만족하는 시점이 되면 구조물·계통·기기에 대한 등급재평가(Reclassification)가 필요하다. 설계기준사고 해석 및 등급재평가에 따라 안전기능을 수행하는 전력설비가 없을 경우 안전급 전력계통에 적용되었던 설계요건들에 대한 재검토가 필요하다. 즉 원자력안전을 위해 적용되었던 설계요건들은 모두 삭제되고 일반 전기안전 요건들만 존재하게 된다.

사용후연료가 사용후연료저장조에서 독립된 건식저장시설로 이동되면 독립저장시설에 대한 인허가 요건인 10CFR 72[4]가 적용된다.

3. 영구정지 시 전력계통 운영방안

영구정지 시 전력계통의 운영은 영구정지 이후의 해체전략에 따라 결정할 수 있다. 사용후연료저장조에 사용후연료를 저장한 상태에서 즉시해체(DECAN: Decommissioning Approach Involving Immediate Dismantlement) 방식을 선택할 경우 독립 사용후연료저장조 냉각시스템의 설치가 효율적이다. 독립 사용후연료저장조 냉각시스템 설치의 주 목적은 해체 시 사용후연료저장조에 대한 영향을 최소화하기 위한 것이다. 따라서 전력공급의 경우에도 별도의 전력공급계통을 설치하여 운영하는 것이 효과적이다. 따라서 기존 소내전력공급 계통과 별도의 전원공급 라인을 설치하여 사용후연료저장조 냉각 및 해체에 필요한 전원공급하는 방안은 제안한다.

일정기간 경과 후 해체를 수행하는 지연해체(SAFSTOR: Safe Storage)의 경우 영구정지 이후 단계에 따라 전력계통의 구성을 별개로 운영하는 것이 필요하다.

그림 3은 일반적인 가동원전 전력계통의 구성도이다. 영구정지 후 2단계에서는 전력계통 구성의 효율화가 필요하다. 가동원전의 경우 생산된 전력의 공급과 정비 혹은 비상 시 소내에 전력을 공급하기 위해 물리적으로 독립된 2개 이상의 소외전력 회선을

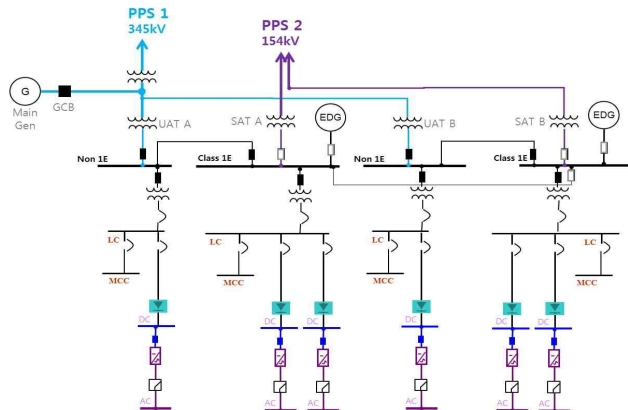


그림 3 간략화된 가동원전 전력계통의 구성도
Fig. 3 Simplified configuration of electric system of operating plant

통해 소내에 전력을 공급하고 있으며 이에 따라 주변압기, 소내 보조변압기, 대기보조변압기 등의 대형변압기가 설치되어 있다. 변압기의 손실은 부하손(동손)과 무부하손(철손)으로 구분할 수 있으며, 무부하손은 부하의 크기에 관계없이 전압의 인가만으로도 내부에서 상시 발생하는 손실이다. 따라서 운영비용이 수반되는 관리대상 설비의 수 및 상시 가압되는 변압기 수의 감소를 통해 비용을 절감할 수 있다.

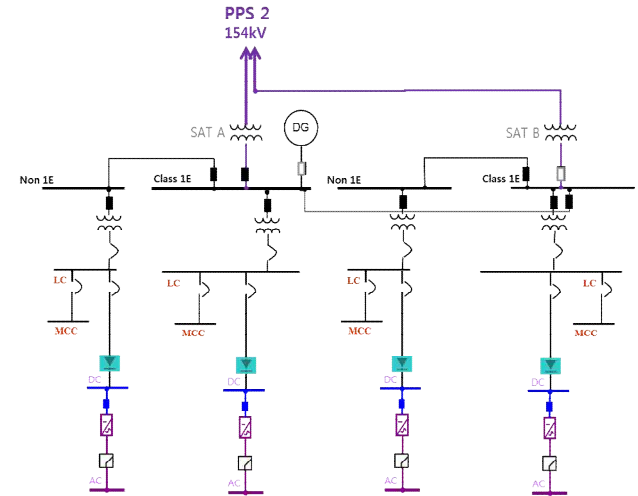


그림 4 간략화된 영구정지 시 전력계통의 구성도
Fig. 4 Simplified configuration of electric system of permanent shutdown plant

그림 4는 상시 가압되는 변압기의 수를 줄이기 위한 운영방안이다. 소내전력 공급을 위해 주변압기와 소내보조변압기를 거쳐야 하는 우선전력회로 1을 사용하지 않고 대기보조변압기를 사용하는 우선전력회로 2를 소내전력 공급회로로 사용하는 것이 유리하다.

영구정지 이후에는 가동원전에 비해 소내부하가 1/2 이하이므로 한 대의 대기보조변압기를 통해 전체 소내부하에 전원공급이 가능하다. 따라서 한 대의 대기보조변압기를 통해 전원을 공급하고 다른 하나의 대기보조변압기는 백업전원 용으로 사용할 수 있어, 전력계통의 운영비용의 절감과 동시에 백업전원의 확보를 통해 전력공급의 신뢰성을 유지할 수 있다.

영구정지 이후의 소내부하가 하나의 대기보조변압기 용량에 비해 상당히 적을 경우 변압기 손실의 절감을 위해 적정용량의 변압기로의 설계변경을 고려할 수 있다. 기존 변압기와 새로운 변압기의 고장률, 정비비용이 같다고 가정하면 아래와 같이 손실비용 및 교체비용 비교를 통해 설계변경 여부의 결정이 가능하다.

$$Y \times (L_1 - L_2) > ER - EW \tag{1}$$

여기서, Y : 운전연수,
 ER : 변압기 개선 비용

- EW : 기존 변압기 가치,
- L₁ : 기존 변압기 손실비용
- L₂ : 신규 변압기 손실비용

4. 사례연구

본 논문에서는 원자력발전소 영구정지 후 각 단계에 따른 소내전력계통 운영방안을 제안하였다. 본 장에서는 소내전력계통에 전원을 공급하기 위한 수전변압기의 수에 따른 손실을 비교하였다. 또한 적정 용량의 변압기로 교체 여부의 결정을 위해 건설저장시설로 이동전까지의 운전예상기간에 따른 개선효과를 비용으로 분석하는 방법을 소개한다.

영구정지 이후 운영원전과 동일하게 주변압기와 두 개의 보조변압기를 통해 전원을 공급받을 경우의 변압기 손실과 한 개의 대기보조변압기를 통해 전원을 공급받을 경우의 변압기 손실은 아래 표 3과 같다.

표 3 변압기 손실 비교

Table 3 Comparison of Transformer Loss

CASE 1	정격 용량	부하 용량	무후하 손실	부하 손실	총 손실
MTR	750MVA	2.1MW	312kW	0.01kW	312kW
UAT_A	18MVA	1.1MW	18kW	0.70kW	18.7kW
UAT_B	18MVA	1MW	18kW	0.58kW	18.6kW
SAT_A	18MVA	-	21kW	-	21kW
SAT_B	18MVA	-	21kW	-	21kW
총 손실 합계					391.3kW
CASE 2	정격 용량	부하 용량	무후하 손실	부하 손실	총 손실
SAT_A	18MVA	2.1MW	21kW	1.3kW	22.3kW

운영 원전과 같이 주변압기와 두 개의 보조변압기를 통해 전원을 공급 받고 대기보조변압기를 Standby 상태로 둘 경우 한 개의 대기보조변압기를 통해 전원을 공급 받는 경우보다 369kW의 추가 손실이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 핵연료취급사고의 허용기준이 만족되고 사용후연료 수위 감소 시 충분한 여유가 확보되는 시점 이후에는 1대의 대기보조변압기를 통해 소내에 부하를 공급하고 다른 1대의 대기보조변압기를 백업으로 두는 방안이 효율적이다.

영구정지 이후에도 기존의 변압기를 사용할 경우 무부하 손으로 인한 손실이 굉장히 큰 것을 알 수 있다. 영구정지 이후의 부하용량을 고려하여 5MVA의 변압기를 채용할 경우 손실은 아래와 같다[8].

- 5MVA 변압기 40%부하 시 손실 : 5.9kW

기존 대기보조변압기와 비교하여 16.4kW의 손실을 절감할 수 있다. 변압기 교체여부 결정은 식 1과 같이 변압기의 교체비용 및 예상 운전기간을 통해 결정할 수 있다. 예상 운전기간을 5년으로 가정할 시 변압기 교체를 통한 5년간의 손실절감 비용은 아래와 같이 계산할 수 있으며, 아래 손실절감 비용과 변압기 교체비용을 비교하여 교체여부를 결정할 수 있다.

$$16.4kW \times 24 \times 365 \times 5year \times \text{전력량요금} \quad (2)$$

3. 결 론

국내 원자력발전소는 1978년 처음 상업운전을 시작해 20기 이상이 운영되고 있다. 원자력발전소의 운영허가 종료 후 영구정지가 되면 더 이상 전력생산을 하지 않고, 사용후 연료의 안전관리만이 중요하기 때문에 전력계통 역시 이에 최적화된 운영방안 수립이 필요하다.

본 논문에서는 영구정지 된 원자력발전소의 소내전력계통 구성 및 운영에 영향을 미치는 영구정지 시 소요부하와 가동원전에 적용되었던 설계요건들의 검토결과를 제시하였다. 또한 영구정지 이후 단계별 전력계통의 운영방안을 제안하였다.

향후에는 원자력발전소 해체단계를 고려하여 원자력발전소 소내전력계통 구성에 대한 최적화 기술 개발이 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] T.E. Collins, G. Hubbard, "Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants," NUREG-1738, NRC, 2001.
- [2] "Kewaunee Power Station Updated Safety Analysis Report," Chapter 14, Revision 25.3, 2015.
- [3] "General Design Criteria for Nuclear Power Plants" 10CFR 50 Appendix A, NRC.
- [4] "Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High-Level Radioactive Waste, and Reactor-Related Greater than Class C Waste", 10CFR 72, NRC.
- [5] "Proposed Standard Technical Specifications for Permanently Defueled Westinghouse Plants," NUREG-1325, NRC.
- [6] C. Wood "Decommissioning Planning Experiences from U.S. Utilities," EPRI-1013510, EPRI, 2006.
- [7] K. Kim "San Onofre Nuclear Generating Station - Unit 1 Decommissioning Experience Report," EPRI-1016773, EPRI, 2008.
- [8] Hyosung, "laser High Efficiency/Low noise Mold transformer technical proposal", 2008.

저 자 소 개



임 희 택 (Hee-Taek Lim)

1981년 3월 15일생, 2009년 명지대학교 전기공학과 졸업(공학석사), 2013년 동대학원 박사수료, 2011년~현재 한수원 중앙연구원 선임연구원



이 광 대 (Kwang-Dae Lee)

1961년 2월 11일생, 1986년도 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1988년도 한국과학기술원 핵공학과 졸업(공학석사), 현재 한수원 중앙연구원 수석연구원



전 당 희 (Dang-Hee Jeon)

1966년 12월 15일생, 2005년도 삼척대학교 산업대학원 졸업(석사), 현재 한수원 중앙연구원 부장



윤 종 현 (Jong-Hyun Youn)

1967년 5월 6일생, 2014년도 방송대 영어영문학과 졸업(학사), 현재 한수원 중앙연구원 차장



주 익 덕 (Ik-Deok Joo)

1968년 12월 25일생, 1994년도 전북대학교 기계설계공학과 졸업(공학사), 2012년도 광주교육대학원 다문화학과 졸업(교육학석사), 현재 한수원 중앙연구원 교류연구원