'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

위험도에 의거한 다호기 부지의 대체교류전원용 DG 설치방안

Risk-Based Decision on Configuration of AAC DGs in Multi-Units Site

김명기, 정백순

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내의 경우는 해외와 달리 하나의 부지에 6기까지 원자력발전소가 건설되고 있어 부지 내 발전소정전사고에 대한 대책에 주의를 요한다. 현재 대체교류전원 확보방안으로 부지당 별도의 비상디젤발전기 1대를 더 추가하는 안과 2대를 추가하는 안이 대두되고 있다. 본 논문에서는 원전 확률론적안전성평가 방법을 사용하여 전기계통의 신뢰도, 개별원전의 노심손상빈도, 부지내 각 원전의 노심손상빈도 평균치를 분석하여 최적안을 도출한다. 분석 결과 대체교류전원을 추가로 확보함으로서 전기계통의 신뢰도는 4.5% 정도 향상되며, 개별 노심손상빈도에는 변함이 없는 것으로 나타났다. 그리고 부지내 전 원전의 노심손상빈도의 평균치는 비상디젤발전기를 2대 설치하는 안이 1대 설치하는 안의 경우보다 약 1.4% 안전성이 향상되는 것으로 밝혀졌다. 그러나 이런 안전성 변화는 미국의 Reg. Guide 1.174의 위험도평가 기준으로 볼 때 미미한 것으로 나타났다. 따라서 국내 소외전원상실사고에 대비하여 대체교류전원용으로 비상디젤발전기를 설치할 경우에는 부지당 1대의 비상디젤발전기를 설치하여도 안전성 확보에는 충분한 것으로 결론을 내릴 수 있다.

Abstract

Since a domestic nuclear plant site different from overseas has 6 units in a site, it is necessary to consider deeply a mitigating measure to station blackout accident(SBO). Currently it is proposed the installation of additional diesel generator to ensure a alternative AC power source, but it has not been decided yet how many diesel generators should be installed in a multi-units site: one or two. In this paper, risk-based decision making method, which evaluates reliability, core damage frequency, and average of core damage frequencies of nuclear power plants, is introduced to draw up the suitable number of diesel generator. The results shows that installing two diesel generators increases 1.4% of average of core damage frequencies as compared with installing one diesel generator but for both cases 4.5% of reliability of the electrical system equally increases. In the light of risk-informed decisions in regulatory guide 1.174, there is no difference of safety between two alternatives. It is concluded that one additional diesel generator sufficiently guarantees safety against station blackout of nuclear power plants in multi-units site.

1. 서론

일반적으로 가압경수로 원자력발전소에서 중대사고에 의한 노심손상 발생사건중 발전소 정전사고(SBO: Station Blackout)사고가 중요한 사고중의 하나로 밝혀지고 있다. 발전소 정전사고란 발전소내 필수 및 비필수 스위치기어 모선에 공급되는 모든 교류전원이 완전 상실되는 사고로 소외전

원의 상실, 터빈정지에 의한 소내전원공급 상실과 비상발전기의 이용불가 상태를 말한다. 미국 원자력위원회에서는 발전소 정전사고에 대비하여 대체교류전원을 확보하거나 분석을 통하여 발전소 정전사고시에 안전하다는 입증을 요구하는 규제를 만들었다[1]. 국내에서도 발전소 정전사고의 중요성을 인식하여 영광 3,4호기 이후 신규원전에서는 발전소 전원상실사고의 대책으로 대체교류전원용 비상디젤발전기를 설치하였다. 현재 영광 부지에는 영광 3호기, 4호기, 5호기, 및 6호기가 1대의 대체교류전원용 비상디젤발전기를 공유하고 있으며, 울진 원전부지의 경우도 마찬가지로 3호기, 4호기, 5호기, 6호기가 대체교류전원용 비상디젤발전기를 공유하고 있다. 이런 상황에서 가동중 원전의 대체교류전원 확보 방안을 고려할 때에는 1)별도의 비상디젤발전기를 추가로 설치하는 방안과 2) 기존 설치되어 있는 타호기용 비상디절발전기를 공유하는 방안을 생각할 수 있다. 만약 추가로 비상디젤발전기를 설치하는 경우에는 충분히 발전소 정전사고대책을 수립하겠으나 경제적으로 본다면 큰 투자를 요하는 것이 되겠다. 반면 기존의 대체교류전원용 비상디젤발전기를 공유할 경우에는 한 대의 비상디젤발전기를 최대 6기의 원전에서 공유하기 때문에 원래 발전소정전사고에 대비하여 설치된 비상디젤발전기의 고유 목적이 훼손될 우려가 있을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 다호기 부지에서의 발전소 정전사고에 대비용 비상디젤발전기를 설치할 경우, 1대를 설치하는 방안과 2대를 설치하여 공유하는 방안에 대해서 확률론적안전성 평가를 통하여 최적 대안을 제시하고자 한다.

2. 분석의 방법

그림 1에서 보는 바와 같이 울진5호기와 같은 원전이 6기가 설치되어 있는 다호기 부지를 대상으로 대체교류전원 공급안에 대해 원전의 전기계통(4.16kV) 신뢰도, 개별 노심손상빈도[1], 및 노심손상빈도 평균치[2]를 평가하였다. 기본안 경우1은 2대의 비상디젤발전기가 설치되어 원전 2기와 4기에 각각 1대의 비상디젤발전기가 연결되어 있은 안이며, 기본안 경우2는 6기의 원전이 1대의 비상디젤발전기를 공유하는 안이다.

먼저 각 대안의 4.16kV 안전모선 A, B의 신뢰도를 분석하기 위하여 고장수목을 작성하였다. 정점사건은 “4.16kV 안전모선 A에 전력이 공급이 안될 경우”와 “4.16kV 안전모선 B에 전력이 공급이 안될 경우”로 하였다. 본 분석에서 사용된 데이터는 울진 5,6호기 PSA 중간보고서[2]의 데이터를 사용하였는 데 이는 EPRI-URD[3]데이터를 기본으로 한 것이다.

고장수목의 기본사건 중 디젤발전기, 브레이커 공통원인고장의 모델링은 보수적으로 β factor 방법을 사용하였고 β factor를 0.1[3] 로 가정하였다. 이는 다호기 부지의 경우 공통원인고장을 MGL 방법으로 분석한다는 것이 거의 불가능하기 때문이다. 예를 들어 부지내에 4.16kV 안전모선 A에 설치되어 있는 브레이커의 경우를 보면, 부지 전체에 해당 브레이커의 수는 12 (2개(A,B 트레인)/호기×6기)개가 되며 이들의 공통원인 고장분석은 거의 불가능하다. 본 분석에서는 이런 점을 해결하기 위해 매우 보수적인 방법이지만 β factor 방법으로 공통원인고장을 고려하였다. 즉 임의의 브레이커에서 고장이 발생되면 다른 호기에서도 이와 유사한 브레이케도 동시에 고장이 발생되며 이런 비율은 개별 브레이커의 고장확률의 10% 정도로 발생한다고 보는 것이다.

또한 대체교류전원용 비상디젤발전기의 정비주기를 12개월, 정비기간을 15일로 간주하였다. 일반적으로 원전의 년차정비주기는 18개월이므로 대체교류전원용 비상디젤발전기의 정비작업은 분석하고자 하는 원전의 출력 운전중에 수행한다고 볼 수 있으므로 노심손상빈도 분석시 년차정비에 의한 이용불능도를 기본사건으로 고려하였다.

제어계통의 신뢰도 관점에서 대체교류전원인 비상디젤발전기의 공용화를 위해서는 제어계통이 설

---

1) 개별 노심손상빈도란 다호기부지에 있어서 임의의 원전의 노심손상빈도를 말하며 일반적으로 현재까지 정의 해온 노심손상빈도를 말한다.

2) 노심손상빈도 평균치란 다호기 부지의 경우 모든 원전의 노심손상빈도 값에 대한 산술평균치를 말한다. 단독부지의 원전의 경우 개별 노심손상빈도와 노심손상빈도 평균치는 같다.

치되는 데 본 분석에서는 이의 이용불능도를 1.0E-4으로 간주하였다. 그리고 대체교류전원용 비상디젤발전기의 운전은 수동으로 작동되므로 운전원의 실수가 발생될 수 있으므로 운전원 오류 확률을 1.36E-3으로 간주하였다.

본 논문에서는 대표원전이 부지내에 6기가 설치되어 있는 경우를 분석하여 국내 전 부지에 적용하려고 하는 데 이는 다음과 같은 이유로 해서 타당성이 있다. 국내 각 원전은 PWR 발전소로서 서로 중대사고추이가 비슷하며 대체교류전원이 없을 경우에 소외전원상실사고가 주요한 사고추이로 나타났다. 따라서 한 부지에 서로 다른 PWR 발전소가 있더라도 비상디젤발전기의 추가 설치에 따른 안전성변화는 그 크기는 다를지 몰라도 변화하는 경향은 같기 때문에 부지별로 안전성 영향 평가를 수행하지 않아도 대표원전을 보유한 다호기 부지에 대해서 만 분석하여도 최적 대안을 도출할 수가 있다.

부지내 대체교류전원용 비상디젤발전기의 설치 대수에 따른 원전의 안전성 변화를 보기 위하여 개별 노심손상빈도 값과 노심손상빈도 평균치를 고려하였다. 개별 노심손상빈도 값은 AAC DG가 추가로 설치됨으로서 개별 원전의 안전성이 얼마나 향상되는가를 보기 위함이다. 예를 들어 그림2의 2안과 같이 1대의 AAC DG를 두 호기에서 공유하고 있다면 1호기의 AAC DG는 2호기에서 SBO가 발생하지 않으면 사용할 수 있다. 따라서 이런 조건부 확률을 기본사건(Basic Event)으로 고려하여 1호기의 노심손상빈도를 구한다. 다음은 부지 전체로 볼 때 AAC DG가 추가로 설치됨으로서 부지내에 있는 개별 원전의 노심손상빈도 평균치의 변화를 보는 것이다. 이는 부지내에 LOOP사고가 단독 호기별로 일어나지 않고 복수의 원전에서 동시에 발생할 경우 AAC DG의 설치 효과를 보다 잘 나타내 준다. 예를 들어 그림 1의 발전소 부지의 전체 호기에서 LOOP사고가 발생하면 경우1에서는 원전 2기는 AAC DG의 전원을 공급받을 수 있고 나머지 4기는 AAC DG의 전원을 공급받을 수 없다. 그리고 경우 2에서는 1기만 AAC DG의 전력을 공급받고 나머지 5기는 전력을 공급받을 수 없다. 그러므로 발전소 전체 부지측면에서 보면 각 개별 원전의 노심손상빈도의 평균치가 AAC DG의 설치 효과를 보여주는 인자로 생각할 수 있다.

3. 분석결과

가. 신뢰도 분석

전력계통의 신뢰도분석을 위하여 고장수목 (Fault Tree)을 작성하였다. 표 1에 보는 바와 같이 울진 5호기의 전기계통의 신뢰도를 살펴보면 2대의 비상디젤발전기를 2기 및 4기가 각각 공유하는 경우(1안)와 1대의 비상디젤발전기로 6기가 공유하는 경우 (2안)의 안전모선 A와 B의 신뢰도는 동일한 것으로 나타났다. 즉 한 대의 대체교류전원을 4기에서 공유하나 6기에서 공유하나 각 원전의 전기계통의 신뢰도는 같다고 말할 수 있다.

표 1의 1안과 2안의 안전모선 A와 B의 신뢰도(대체교류전원은 B모선에 만 연결)를 비교해 보자. 표에서 보는 바와 같이 1안 및 2안 모두 A모선의 신뢰도는 5.039E-6이고, B모선의 신뢰도는 4.831E-6으로 나타났다. 이는 대체교류전원을 설치함에 따라 전기계통의 신뢰도는 4.5% 향상되었음을 알 수 있다.

나. 노심손상빈도 분석

그림 2에서 보는 바와 같이 비상디젤발전기의 공급안에 대한 개별 원전의 노심손상빈도 값을 구하기 위하여 울진5,6호기 PSA Level 1을 수행하였다. 표 2는 그 결과를 보여주고 있으며 AAC DG가 설치되어 있지 않은 경우(대안 1)는 노심손상빈도가 9.314E-6이고 1대의 전용 대체교류전원을 설치할 경우(대안 2)는 노심손상빈도는 7.55E-6이다. 즉 AAC DG가 설치됨으로 인해서 안전성은 약 19%정도 향상된다.

다음은 한 대의 대체교류전원을 다호기에서 공유하는 경우로, 노심손상빈도는 공유하는 원전 수에 관계없이 7.55E-6으로 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다(대안 2 ~ 대안 5). 이는 한 대의 대체교류전원을 한 대 이상의 원전에서 공유할 때에는 공유하는 원전의 수와는 관계없이 노심손상빈도

는 동일함을 말한다. 이는 다음과 같이 정성적으로 설명될 수 있다.

(1) 1대의 대체교류전원으로 2기의 원전이 공유하는 경우

임의의 원전에서 대체교류전원을 사용하기 위해서는 나머지 1기의 원전에서 SBO가 발생하지 않아야 한다. 이런 상황을 고려하여 AAC DG의 이용불능도를 구하면 다음과 같다:

- 1기의 원전에서의 SBO발생빈도 = 소외전원상실사고빈도
  ×DG1 및 DG2의 공통원인고장
  = 0.0313×0.005
  = 1.57E-4

  단: DG1,2의 CCF = 0.005
  = 0.05×0.1 (DG 신뢰도목표 = 95%, β factor: 0.1)
- AAC DG이용불능도 = 1-(1-1.57E-4)×(1-0.05)
  = 0.05015

(2) 1대의 대체교류전원으로 6기의 원전이 공유하는 경우

임의의 한 원전에서 대체교류전원을 사용하기 위해서는 나머지 5기의 원전에서 SBO가 발생하지 않아야 한다. 이런 확률을 구하면 다음과 같다:

- 5기의 원전에서의 SBO발생빈도 = 5×소외전원상실사고빈도
  ×DG1 및 DG2의 공통원인고장
  = 5×0.0313×0.005
  = 7.85E-4
- AAC DG이용불능도 = 1-(1-7.85E-4)×(1-0.05)
  = 0.05075

(1)과(2)의 결과를 보면 AAC DG를 2기가 공유할 때와 6기가 공유할 때 DG의 이용불능도는 5.015E-2에서 5.075E-2로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 ACC DG의 이용불능도를 기본사상으로 고장수목에 반영하여 PSA를 재 수행한 결과 노심손상빈도에는 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

다. 부지내 원전 노심손상빈도 평균값

다호기 부지에서 LOOP 사고가 복수의 원전에서 발생할 경우 AAC DG의 유용성을 확인하기 위하여 부지내 노심손상빈도 평균치를 분석하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이 6기의 원전이 있는 다호기 부지에 대체교류전원으로 AAC DG가 2대 있을 경우(경우1)와 1대 있을 경우(경우2)에 대하여 부지내 원전의 노심손상빈도 평균치를 계산한다. 경우1은 2대의 AAC DG가 설치되어 있어 1대 DG로 2기원전(1호기, 2호기)에 전력을 공급하는 안이고 경우2는 1대의 AAC DG로 전호기에 전력을 공급하는 안이다.

우선 임의의 원전에 LOOP 사고가 발생했을 때 부지전체에 LOOP 사고가 발생되는 빈도를 구한다. 본 분석에서는 국내 원전의 LOOP 발생자료를 기반으로 부지 전체에 LOOP사고가 발생되는 빈도를 구하였다. 국내 원전의 LOOP 사건은 총 4건이 발생하였는 데 이중 2건은 두 호기가 동시에 발생(고리 3호기 및 4호기)한 경우이다. 본 분석에서는 보수적인 입장에서 다호기 원전 부지에서의 LOOP사고를 개별원전 LOOP사고발생 빈도의 50%로 간주하였다. 이는 부지 전체 원전의 LOOP 발생빈도는 개별원전의 LOOP 빈도의 0.5배 즉 공통원인고장의 β factor가 0.5임을 의미한다.

그림 1의 경우1과 경우2에 대하여 노심손상빈도 평균치를 계산하기 위해서는 먼저 LOOP사고가 부지내 전호기 원전에서 발생했을 때의 개별 원전 노심손상빈도를 구하고 이어서 LOOP사고가 발

전소별로 독립적으로 발생하는 경우의 노심손상빈도를 계산하여 이를 가지고 노심손상빈도 평균치를 구한다.

(1) 부지전체가 LOOP 사고발생 시 노심손상빈도 평균치

- 경우 1 대안;

AAC DG 전력공급을 받을 수 없는 원전수 ; 4기, 개별 원전 CDF = 9.314E-6 (표 4)
AAC DG 전력공급을 받을 수 없는 원전수 ; 2기, 개별 원전 CDF = 7.55E-6 (표 4)

평균 노심손상빈도 = (4×9.314E-6 + 2×7.55E-6)/6
= 8.726E-6

- 경우 2 대안;

AAC DG 전력공급을 받을 수 없는 원전수 ; 5기, 개별 원전 CDF = 9.314E-6
AAC DG 전력공급을 받을 수 없는 원전수 ; 1기, 개별 원전 CDF = 7.55E-6

평균 노심손상빈도 = (5×9.314E-6 + 1×7.55E-6)/6
= 9.02E-6

(2) LOOP 사고가 독립적으로 일어날 시 노심손상빈도 평균치

- 경우 1 대안;

1대의 AAC DG로 2기의 원전에 전력을 공급하는 경우 AAC DG의 이용불능도 :
1-(1-0.0313×0.005)×(1-0.05) = 0.05015
1대의 AAC DG로 4기의 원전에 전력을 공급하는 경우 AAC DG의 이용불능도 :
1-(1-3×0.0313×0.005)×(1-0.05) = 0.05045

위의 AAC DG 이용불능도 데이터를 가지고 발전소 노심손상빈도를 분석한 결과 두 경우 동일하게 노심손상빈도는 7.55E-6(표 4.)으로 나타났다.

- 경우 2 대안;

1대의 AAC DG로 6기의 원전에 전력을 공급하는 경우로 이 때 DG의 이용불능도:
1-(1-5×0.0313×0.005)×(1-0.05) = 0.05075

위의 AAC DG 이용불능도 데이터를 가지고 발전소 노심손상빈도를 분석한 결과 노심손상빈도는 7.55E-6(표 4.)으로 나타났다.

따라서 전체 노심손상빈도 평균치를 구하면 다음과 같다.

경우 1 대안;

노심손상빈도 = (8.726E-6 + 7.55E-6)/2
= 8.138E-6

경우 2 대안;

노심손상빈도 = (9.02E-6 + 7.55E-6)/2
= 8.285E-6

ΔCDF = 1.47E-7 (1.8%)

이상에서 보는 바와 같이 6기 다호기 부지 경우, 대체 교류전원용 AAC DG를 1대 설치하여 공용하는 안과 2대를 설치하여 공용하는 안을 비교해 보면 2대 설치하는 경우가 안전성이 1.8% 정도 (ΔCDF는 1.47E-7) 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 상기의 안전성 변화 값은 Reg. Guide 1.174에서 제시하는 안전성 평가기준에 의하면 미미한 것으로 해당된다.

4. 결론

본 분석에서는 각 부지별로 대체교류전원용 비상디젤발전기의 연결 대안에 따라 전력계통의 신뢰도와 개별 노심손상빈도, 노심손상빈도 평균치를 분석하였으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 대체교류전원용 비상디젤발전기를 설치할 때 전기계통의 신뢰도는 4.5% 향상된다.
2. 대체교류전원용 비상디젤발전기가 설치될 경우와 안될 경우, 노심손상빈도는 19% 정도차이가 난다.
3. 다호기 부지에서 소외전원정전사고가 발전소별로 독립적으로 발생할 경우, 한 대의 대체교류전원용 비상디젤발전기를 원전1기가 사용하는 방안과 원전6기가 공용하는 방안을 비교해보면 개별 노심손상빈도와 노심손상빈도 평균치는 같다.
4. 다호기 부지에서 소외전원정전사고가 발전소별로 동시 다발적으로 발생할 경우, 두 대의 대체교류전원용 비상디젤발전기를 설치하는 경우가 한대의 DG를 설치하는 경우보다 노심손상빈도 평균값은 1.8% 정도 (ΔCDF: 1.47E-7) 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 이 크기는 확률론적 안전성 측면에서 볼 때 미미하다.
5. 결론적으로 발전소 정전사고에 대처하기 위한 비상디젤발전기 설치 방안은 부지당 한 대를 설치하여도 안전성은 충분히 확보된다.

참고문헌

[1] U.S. NRC, Regulatory Guideline 1.155, 1988

[2] KEPRI, "울진5,6호기 확률론적안전성평가(II단계)," 중간보고서, 1999. 8

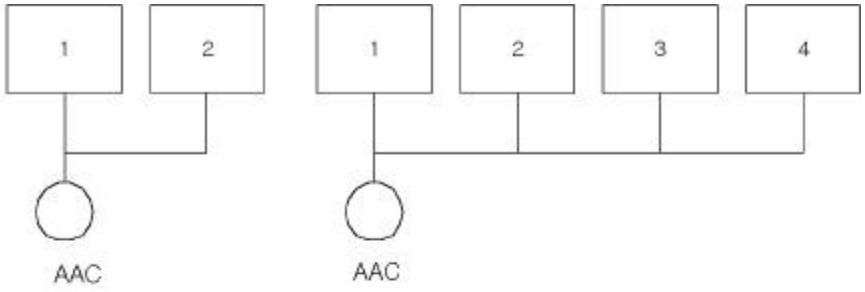
[3] "Advanced Light Water Reactor Requirement Document Vol III," Rev. 7, EPRI, 1995

표 1. 울진5호기 전력계통 신뢰도분석 결과

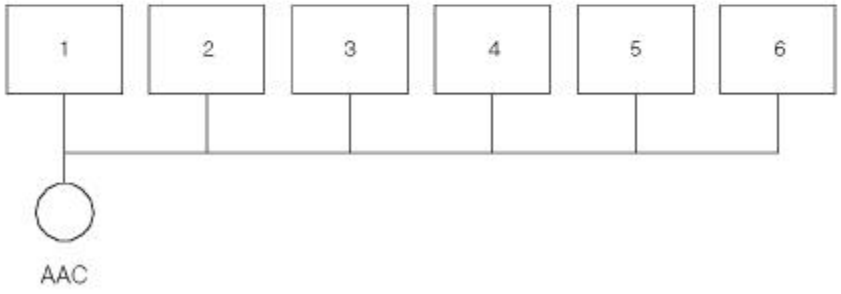
울진5호기		1 안 (U-E101)	2안 (U-E102)
대안 내용	AAC 대수	1대: 울진1,2호기공용 1대: 울진3,4,5,6호기 공용	1대: 6호기 공용 (울진1,2,3,4,5,6호기)
	AAC 전력 공급트레인	울진1,2호기 A 트레인 울진3,4,호기 A,B 트레인 울진5,6호기 B 트레인	울진1,2호기 A 트레인 울진3,4,호기 A,B 트레인 울진5,6호기 B 트레인
신뢰도	4.16kV A-트레인	5.039E-6	5.039E-6
	4.16kV B-트레인	4.831E-6	4.831E-6

표 2. 대체교류전원 공유에 따른 노심손상빈도 결과

대안	Configuration 설명	노심손상빈도(/Ry)	비고
1	AAC가 없을 때	9.31E-6	-
2	1대 AAC로 원전1기 전용	7.55E-6	안전B모선 전력공급
3	1대 AAC로 원전2기 공용	7.55E-6	안전B모선 전력공급
4	1대 AAC로 원전4기 공용	7.55E-6	안전B모선 전력공급
5	1대 AAC로 원전6기 공용	7.55E-6	안전B모선 전력공급



경우 1



경우 2

그림 1 대체교류전원용 디젤발전기 연결도

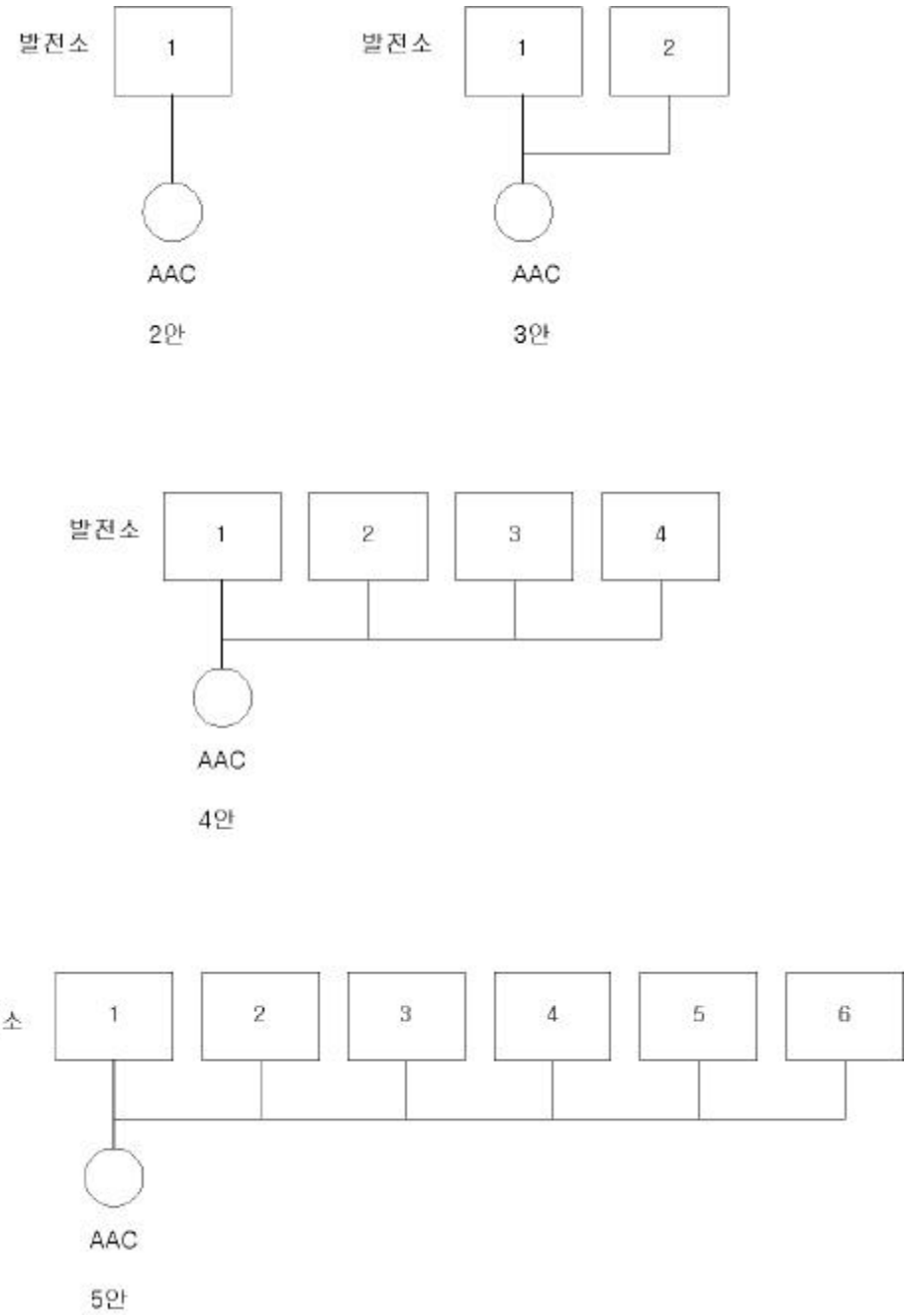


그림 2 대체교류전원 대안