

영광1,2,3,4호기 비상디젤발전기 종합신뢰도 분석

김영호¹⁾, 최광희, 정현중

요 약

영광1,2,3,4호기 비상디젤발전기(EDG)의 신뢰도 수준을 파악하기 위하여 시험관리대장과 운전불능관리대장, 그리고 발전과장일지를 조사하여 신뢰도 및 이용불능도를 분석하였다. 신뢰도는 EDG의 유효시험 데이터를 이용하여 계산하는 유효 신뢰도와 무효시험까지 포함하여 계산하는 전체 신뢰도로 구분하였으며, 이용불능도는 EDG를 정비모드로 전환시키고 작업함으로써 이용불능을 유발하였던 정비 이용불능도, 그리고 유효시험 실패로 인하여 정비모드를 유발하는 경우에 잠재적 고장 시간까지 포함한 종합 이용불능도로 구분하였다. 분석 결과로서 영광1호기 EDG의 유효 신뢰도는 0.995, 2호기는 1.0으로 매우 높은 수준을 유지하고 있었으며, 이용불능도의 역인 이용가능도는 1호기 A계열 EDG는 0.978, B계열은 0.979, 2호기 A는 0.991, B는 0.976으로 높은 수준이었다. 3,4호기 EDG의 유효 신뢰도는 1,2호기와 마찬가지로 높은 수준이었으나, 전체 신뢰도는 텀덤형 디젤엔진이 갖는 근본적 부하불균형 문제 때문에 낮은 수준이었다. 따라서, 영광3,4호기 EDG의 신뢰도를 높이기 위해 많은 노력을 기울였으며, 이를 통해 EDG 신뢰도 개선에 도움이 된 것으로 분석되었다.

1. 서 론

원자력발전소 비상디젤발전기(EDG) 소의 교류 전원 상실시(Loss of Offsite Power) 제한된 시간 내에 정격주파수 및 전압에 도달하여 안전관련 설비에 전원을 공급함으로써 원자력발전소를 안전정지 상태로 유지하게 하는 중요한 비상 전력 공급 설비이다. 그러나, EDG가 소의 교류전원 상실과 동시에 기능이 상실되는 발전소정전사고(SBO: Station Black Out)가 발생하면 원자로의 노심 손상을 초래하는 중대한 결과를 낳기 때문에 이를 방지하기 위해서는 EDG의 높은 신뢰도 확보가 중요하다. 이를 위해 영광3,4호기에서는 미국의 산업체 가이드인 NUMARC87-00에 따라 EDG 신뢰도프로그램(Reliability Program)을 수립하였으며, 영광1,2,3,4호기 EDG에 대한 현재의 신뢰도 수준 및 신뢰도프로그램 이행에 따른 개선점을 반영한 향상 정도를 종합적으로 분석을 하였다.

영광1,2,3,4호기 EDG 및 대체용교류전원(AAC)의 신뢰도 분석을 위하여 EDG 기동 및 정지, 그리고 유/무효에 대한 내용이 기록된 시험관리대장을 조사하였으며, 정비 및 고장으로 인한 이용불능도를 위하여 정비 작업보고서의 정비이력 데이터 및 이용불능관리대장의 자료를 조사하여 정비모드로 전환하고 작업하였던 정비이력을 도출하였다. 이러한 데이터는 Reg. Guide 1.155가 신뢰도 계산을 위하여 제시하고 있는 NSAC-108의 정의에 따라 유효 신뢰도를 계산하였으며 이용률과 관련된 신뢰도를 산출하기 위하여 이용불능도의 정의에 따라 정비 이용불능도를 분석하였다. 또한, EDG에 대한 신뢰도를 보수적으로 평가하기 위하여 무효로 판정된 EDG 실패이력까지 포함한 보수적 신뢰도와 정기시험 실패시 잠재적 이용불능 시간까지 고려한 종합 이용불능도를 산출하였다. 이 보수적 신뢰도 및 종합 이용불능도를 기준으로, 98년 4월부터 현재까지 영광3,4호기 EDG에 대하여 수행하였던 고장 근본원인분석 및 향후 신뢰도 프로그램을 이행할 경우 기대되는 신뢰도 향상 정도를 산출하였다.

신뢰도프로그램은 크게 정비 프로그램, 성능감시시스템, 그리고 고장근본원인 분석으로 구성된다. 정비 프로그램은 신뢰도 중심 정비(RCM) 분석을 통하여 얻어진 최적 예방정비

1) 한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16, email : kyho@kepri.re.kr

프로그램을 운영함으로써 기존의 정비 프로그램으로 극복하지 못했던 고장 등을 줄일 수 있다. 성능감시시스템을 운영함으로써 EDG의 성능을 감시하고 과거의 성능 특성과 비교하여 변화를 보였을 경우 이에 대한 적절한 조치를 수행함으로써 고장을 미리 예방할 수 있으며 저하된 성능을 원래의 상태로 복구할 수 있다. 마지막으로 고장근본원인 분석을 이행함으로써 같은 원인에 의한 고장을 예방할 수 있다. 이러한 신뢰도를 향상시키는 인자를 고려하여 신뢰도 및 이용불능도의 향상 정도를 산출함으로써 신뢰도 프로그램 수행이 EDG의 신뢰도에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 신뢰도 산출 방법

NSAC-108은 신뢰도를 기동신뢰도와 부하운전 신뢰도의 두 요소로 정의하고 있다. 일반적으로 EDG는 기동이 성공된 후 부하운전이 투입되는 순서를 따른다. 따라서 두 요소를 분리하여 신뢰도를 산출하고 그 결과를 곱함으로써 EDG에 대한 신뢰도를 산출한다.

$$\text{EDG 신뢰도} = (\text{기동신뢰도}) \times (\text{부하운전 신뢰도}) \quad (1)$$

$$\text{기동신뢰도} = \frac{\text{기동 성공 수}}{\text{총 유효 기동 시도 수}} \quad (2)$$

$$\text{부하운전신뢰도} = \frac{\text{부하공급 성공 수}}{\text{총 유효 부하공급 시도 수}} \quad (3)$$

이용불능도는 신뢰도의 다른 표현으로 어떤 계통에서 고장 발생 시 정비를 통하여 계통을 계속 운전하는 경우에 그 계통의 신뢰도를 나타내는 척도이다. 이용불능도는 정비의 개념이 없는 신뢰도에 비해 보다 보수적인 개념이다. 따라서, 이용불능도는 EDG에 대한 신뢰도를 보다 현실성 있게 감시 할 수 있는 수단이다. EDG의 이용불능도는 이용불능시간을 EDG의 운전요구 시간으로 나눔으로써 산출된다.

$$\text{이용불능도} = \frac{\text{이용불능시간}}{\text{EDG 운전요구시간}} \quad (4)$$

3. 신뢰도 분석 결과

3-1 유효 신뢰도

영광3,4호기의 각 EDG에 대하여 표1의 기간동안 운전 중 실패이력을 조사하였으며, 이 중 유효시험 실패는 3건이었다. 이는 1994년 2월 17일 1호기 B계열에서 발생한 월간정기시험 중 실패, 1996년5월8일 3호기 A계열에서 월간정기시험 중 과속도 트립으로 인한 기동실패, 그리고 1995년 8월 28일 AAC 월간정기시험 중 부하불균형에 의한 부하운전실패이다. 이러한 유효실패를 근거로 신뢰도를 계산한 결과는 표2와 같다. 1호기 B계열 EDG는 109번의 운전 시도 중 1건의 유효실패로 인하여 0.991, 3호기 A계열 EDG는 43번의 운전 시도 중 1건의 유효실패로 인하여 0.977, 그리고 AAC는 36번의 운전 시도 중 1건의 유효실패로 0.972의 신뢰도 결과를 보였다. 이를 제외한 EDG는 유효실패가 발생하지 않아 유효신뢰도는 1이라는 매우 높은 결과가 나왔다. 이 결과를 통하여 영광1,2,3,4호기 EDG 및 AAC의 유효 신뢰도 수준은 매우 높은 수준으로 나타났다.

3-2 전체 신뢰도

영광1,2호기에 대한 전체 신뢰도는 무효시험 실패가 많지 않아 유효 신뢰도와 큰 차이가 없

었으나 영광3,4호기는 이와 달리 상대적으로 많은 무효시험 실패로 인하여 유효 신뢰도와 전체 신뢰도 사이에 큰 차이가 있었다. 특히, 영광3,4호기 EDG는 텐덤형 엔진으로 구조적 부하불균형 문제를 지니고 있어 무효시험 실패가 많은 것으로 나타났다. 이러한 영광3,4호기 EDG의 신뢰도를 향상시키기 위해 부하불균형에 대한 고장근본원인 분석, 주요 시험 실패 원인이었던 배기가스 고온 정지 신호의 제거, 그리고 영광3,4호기 EDG 신뢰도프로그램 수립/이행 등의 조치를 수행하였으며 이에 따른 신뢰도 향상 정도를 분석하기 위한 기준으로 전체 신뢰도를 이용하였다.

영광1,2호기 EDG는 유효시험 실패 1건과 무효시험 실패 2건으로 표2의 결과와 같이 유효와 전체 신뢰도 사이에 큰 차이가 없었다. 영광3,4호기 EDG 및 AAC에서는 두 건의 유효 실패를 포함하여 27건의 실패가 발생하였다. 이를 각 호기 계열별로 분류하면, 표2와 같이 3호기 A계열 EDG 5건, 3호기 B계열 3건, 4호기 A계열 7건, 4호기 B계열 5건, 그리고 AAC 7건으로 나타났다. 3호기 EDG의 고장원인으로는 과속도로 인한 유효 실패 1건, 배기가스 고온으로 인한 실패 2건, 그리고 부하 불균형에 의한 정지가 2건으로 나타났다. 부하불균형에 의한 정지는 3호기 B계열에서 1997년에 1월 15일과 5월 22일 발생한 고장으로, 텐덤형 EDG의 CW측과 CCW측 엔진의 부하 불균형이 원인이었다. 4호기 EDG는 배기가스 고온 정지 6건과 부하불균형에 의한 정지가 2건으로 나타났다. 이 배기가스 고온에 의한 정지는 4호기 A계열의 2주기 첫 시험인 18개월 시험 수행 중에 집중적으로 4번 발생하였으며, 4호기 B계열에서는 2건 발생하였다. AAC는 배기 가스 고온 정지가 3건, 부하 불균형에 의한 정지 1건으로 나타났다. 정지원인을 분석해 본 결과 영광3,4호기 EDG 및 AAC는 크게 두 가지의 반복적인 유형의 정지원인을 갖고 있었다. 이는 전체 27건의 정지 중 배기가스 고온에 의한 정지가 11건으로 약 40.7%에 해당되었으며 부하불균형에 의한 정지는 5건으로 약 18.5%를 차지하여, 이 두 정지원인이 전체의 59.3%에 해당됨을 알 수 있었다. 그 외 기타 원인으로 인한 정지는 11건으로 40.7%이었다.

위와 같은 실패 건수를 근거로 전체 신뢰도를 분석해본 결과는 표2의 유/무효 신뢰도와 같다. 3호기 EDG는 91번의 운전 시도가 있었으며 이중 8건의 실패로 인하여 0.912, 4호기는 63번의 시도 중 12건의 실패로 인하여 0.810, 그리고 AAC는 43번의 시도 중 7건의 실패로 0.837이라는 신뢰도 결과를 보였다. 이 결과에서 특히, 4호기 EDG의 신뢰도가 낮은 것으로 평가되었는데 이는 4호기 A계열 EDG에서 2주기 종료 후 18개월 시험 수행 중 배기가스 고온에 의한 정지가 집중적으로 발생하였기 때문이다. 그러나 현재는 부하불균형 및 배기가스 고온에 의한 실패는 근본원인 분석으로 시정조치가 이루어져 모두 해결되었다.

3-3 정비 이용불능도

이용불능 정비 건수 및 이용불능시간은 표4와 같다. 1호기 A계열 EDG의 이용불능 정비 건수는 28건 이용불능 정비는 611시간, 1호기 B는 21건 585시간, 2호기 A는 21건 265시간, 2호기 B는 18건 534시간, 3호기 A는 15건 176시간, 3호기 B는 11건으로 88시간, 4호기 A는 5건 24시간, 4호기 B는 4건으로 32시간, 그리고 AAC는 17건으로 192 시간으로 나타났으며, 이에 대한 정비 이용불능도의 반대 개념인 정비 이용가능도는 1호기 A계열 EDG는 0.979, 1호기 B는 0.979, 2호기 A는 0.991, 2호기 B는 0.976, 3호기 A계열 EDG는 0.993, 3호기 B계열은 0.997, 4호기 A계열은 0.998, 4호기 B계열은 0.998, 그리고 AAC는 0.993으로 나타났다. 정비만을 고려한 영광1,2,3,4호기 EDG 및 AAC의 이용가능도는 1에 가까운 매우 높은 수준을 유지하고 있음을 보여 주고 있다.

3-4 종합 이용불능도

EDG 정기시험 중 실패가 발생하였을 경우 실패를 유발한 고장이 어느 시점에 발생하였는

지 알 수 없으므로 전 시험 성공 시점으로부터 현재 고장 시점까지의 반을 잠재적인 고장시간으로 고려하여야한다. 이를 위해 EDG의 실패 데이터는 유/무효를 포함한 정지이력 데이터 중 실패로 인한 발생 상황이 LCO유발 혹은 정비모드이었던 실패만을 이용하였으며, 계획예방정비 후 실시하는 18개월 시험 중에 발생한 실패에 의한 잠재적 이용불능시간은 제외하였다. 18개월 시험은 해당 주기의 첫 시험이기 때문에 잠재적 이용불능시간을 산출할 수 없기 때문이다. 특히, 영광1,2호기 EDG의 경우는 3,4호기와 달리 벨 제거 작업으로 인한 이용불능이 유발되고 있어 이러한 잠재적 이용불능시간과 벨 제거 작업으로 인한 이용불능시간을 모두 고려하여 종합 이용불능도를 산출하였다.

이러한 잠재적 이용불능시간은 표5 에서와 같이 3호기 A는 1,476.7시간, 3호기 B는 915.2시간, 4호기 B는 750.8시간, 그리고 AAC는 1,615시간이었으며, 1,2호기 EDG는 이용불능도 산출기간 동안에 유효시험 실패가 발생하지 않아 잠재적 이용불능시간은 없었다. 벨 제거 작업으로 인한 이용불능시간은 1호기 A 88시간, 1호기 B 48시간, 2호기 A 49시간, 그리고 2호기 B 70시간이었으며, 영광3,4호기의 경우는 정제된 냉각수를 사용하므로 벨 제거 작업이 필요치 않다. 이를 토대로 종합 이용가능도를 산출해본 결과는 표5와 같으며, 1호기 A,B는 각각 0.976 및 0.977, 2호기 A,B는 각각 0.990 및 0.973로 정비 이용가능도에 비하여 낮게 나타났으나 그 차이는 적었다. 이는 벨 제거 작업 시간이 상대적으로 정비작업 시간 보다 적었기 때문이며 벨 제거 작업은 영광1,2호기에서 반복적으로 하는 작업이기 때문에 짧은 시간 이내에 숙련되게 처리하고 있음을 보여주고 있다. 3호기 A,B는 각각 0.934 및 0.961, 4호기 A,B는 각각 0.998 및 0.951, 그리고 AAC는 0.931로 정비 이용가능도에 비하여 낮게 나타났다. 이는 잠재적 이용불능시간이 정비 이용불능시간에 비하여 상대적으로 매우 크기 때문이다.

3-5 전체 신뢰도 개선

3-5-1 고장근본원인 분석에 의한 개선사항 반영

영광3,4호기 EDG의 전체 신뢰도는 비교적 낮음을 알 수 있었다. 이는 배기가스 고온 정지와 텐덤형 EDG의 부하 불균형에 기인한다고 할 수 있다. 따라서, 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서 영광3호기 B계열 및 AAC의 부하불균형에 대한 고장근본원인 분석을 1998년 5월과 7월에 수행하여 그 근본 원인을 제거하였다. 4호기 A,B계열에 대해서도 같은 방법으로 1999년 1월에 수행함으로써 부하 불균형의 근본원인을 완전히 제거하였다고 판단된다. 또한, 잦은 실패를 유발하였던 배기가스 고온에 의한 정지는 해외 사례 및 제작사 권고 사항 등 기술적 검토를 바탕으로 현장에서 근본적으로 개선하여 해결하였다. 따라서, 40.7% 이상으로 잦은 실패를 유발하였던 배기가스 고온에 의한 정지는 앞으로 더 이상 발생하지 않도록 개선되었다.

위와 같은 개선사항을 고려하여 전체 신뢰도 향상 정도를 보여주는 결과를 표3에 나타내었으며, 그림2는 이러한 향상 정도를 막대 그래프로 보여주고 있다. 3호기 EDG는 0.956로 향상되었으며, 4호기는 0.937로, 그리고 AAC는 0.930으로 각각 향상된 것으로 나타났다. 특히, 4호기 EDG의 경우 배기가스 고온에 의한 정지와 부하불균형에 의한 정지가 4호기 A계열 EDG에서 전체 7건의 실패 중 6건으로 대부분을 차지하고 있었기 때문에 가장 많이 향상된 것으로 나타났다.

3-5-2 향후 신뢰도프로그램 이행에 의한 개선사항 반영

지금까지 이미 해결된 부하 불균형과 배기가스 고온 문제를 제외한 그 밖의 실패원인들은 신뢰도프로그램의 신뢰도 기반 정비(RCM) 및 성능감시시스템(PMS)을 통하여 대부분 예방될 수 있는 것으로 분석되었다. 현 시점까지 개선하였던 부하 불균형 및 배기가스 고온 문제 해결을 포함하여 RCM 및 PMS가 가동될 경우의 신뢰도 향상 정도를 종합적으로 평가해본 결과, 3

호기 EDG는 0.989, 4호기는 0.968로, 그리고 AAC는 0.977로 크게 향상되는 것으로 나타났다.

4. 결론

영광1,2호기 EDG의 유효 실패는 90.7부터 99.10까지 1B에서 1회, 무효 실패는 2A 및 2B에서 각 1회 발생하였다. 상대적으로 1,2호기에 비해 운전기간이 짧은 3,4호기 EDG (AAC 포함)의 유효실패 2회, 무효 실패 25회와 비교하면 1,2호기 EDG의 실패횟수는 상대적으로 매우 적은 것으로 나타났으며, 이 결과 1,2호기 EDG의 신뢰도는 매우 높은 것으로 나타났다. 1,2호기 EDG의 높은 신뢰도는 3,4호기 EDG에서 근본적으로 나타나는 부하불균형 문제가 없는 등 비교적 안정된 운전 특성을 갖기 때문인 것으로 판단된다. 영광 3,4호기 EDG 및 AAC에 대하여 수행하였던 부하불균형에 대한 고장근본원인 분석 및 배기가스 고온 문제 해결로 영광3,4호기 EDG의 신뢰도 수준은 상당히 향상된 것으로 분석되었으며, 향후 신뢰도프로그램을 효과적으로 이행함으로써 영광1,2,3,4호기 EDG의 신뢰도는 개선되어 안정될 것으로 기대된다.

참고 자료

1. Reg Guide 1.155 (Station Blackout, 1988)
2. Reg. Guide 1.9 Rev.3 (Selection, Design, Qualification, and Testing of Emergency Diesel Generator Units used as Class 1E Onsite Electric Power System at Nuclear Power Plants, 1993)
3. NSAC-108 (The Reliability of Emergency Diesel Generators as U.S. Nuclear Power Plants, 1986)
4. NUMARC 87-00 (Guidelines and Technical Bases for NUMARC Initiatives Addressing Station Blackout at Light Water Reactors, 1987)
5. 연구보고서 “EDG 신뢰도 안전성 평가“(한국원자력안전기술원, 1996. 7)

[표-1] 자료조사 기간

호기/계열	신뢰도 계산 자료	정비이용불능도 계산 자료
1A	1990.07 ~ 1999.10	1996.02 ~ 1999.07
1B	1990.07 ~ 1999.09	1996.03 ~ 1999.07
2A	1990.07 ~ 1999.10	1996.01 ~ 1999.09
2B	1990.07 ~ 1999.09	1997.01 ~ 1999.09
3A	1995.04 ~ 1998.03	좌동
3B	1995.04 ~ 1998.04	“
4A	1996.01 ~ 1997.10	“
4B	1996.01 ~ 1997.11	“
AAC	1995.03 ~ 1998.04	“

[표-2] 영광1,2,3,4호기 비상디젤발전기 신뢰도

호기	유무	유무	신뢰도	유무	유무	신뢰도
1	216	1	0.9954	43	1	0.9938
2	216	0	1	576	2	0.9965
3	84	1	0.9881	91	8	0.9121
4	51	0	1	63	12	0.8095
AAC	36	1	0.9722	43	7	0.8372

[표-3] 영광3,4호기 비상디젤발전기 신뢰도 개선

호기	유무	유무	신뢰도	유무	유무	신뢰도	
3	A	47	3	0.93617	47	1	0.97872
	B	44	1	0.97727	44	0	1
	A&B	91	4	0.95604	91	1	0.98901
4	A	32	1	0.96875	32	1	0.96875
	B	31	3	0.90323	31	1	0.96774
	A&B	63	4	0.93651	63	2	0.96825
AAC	43	3	0.93023	43	1	0.97674	

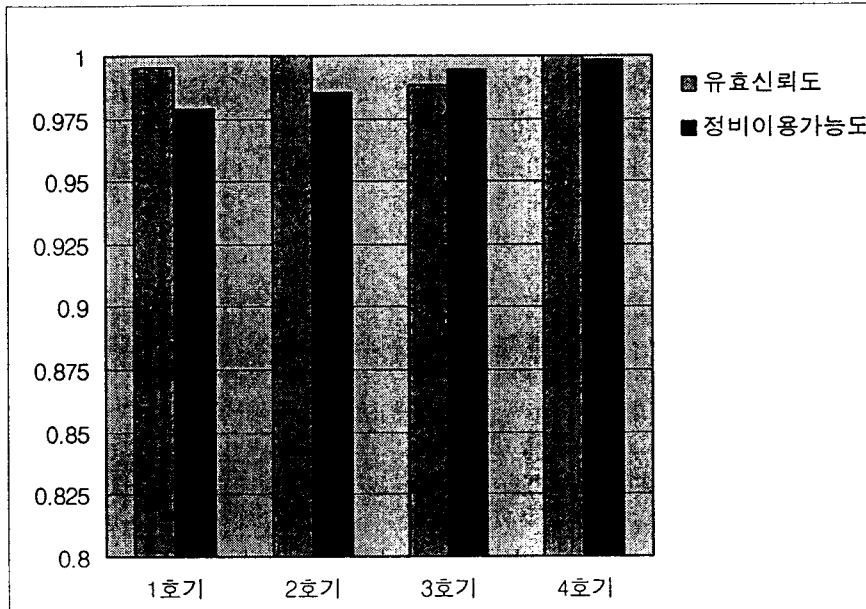
[표-4] 영광1,2,3,4호기 비상디젤발전기 정비이용불능도

호기	유무	유무	신뢰도	유무	유무	신뢰도
1	A	28	611	0.02108	0.97893	
	B	21	585	0.02084	0.97916	
2	A	21	265	0.00857	0.99143	
	B	18	534	0.02371	0.97623	
3	A	15	176	0.00700	0.99300	
	B	11	88	0.00341	0.99659	
4	A	5	24	0.00157	0.99843	
	B	4	32	0.00202	0.99798	
AAC	17	192	0.00732	0.99268		

[표-5] 영광1,2,3,4호기 비상디젤발전기 종합이용불능도

호기	유무	유무	신뢰도	유무	유무	신뢰도	
1	A	611	88	0	699	0.02411	0.97589
	B	585	48	0	633	0.02255	0.97745
2	A	265	49	0	314	0.01016	0.98984
	B	534	70	0	604	0.02680	0.97320
3	A	176	0	1476.65	1652.65	0.06577	0.93423
	B	88	0	915.15	1003.15	0.03892	0.96108
4	A	24	0	0	24	0.00157	0.99843
	B	32	0	750.8	782.8	0.04942	0.95058
AAC 전체	192	0	1615	1807	0.06889	0.93111	

[그림-1] 영광1,2,3,4호기 유효 신뢰도 및 정비 이용가능도



[그림-2] 영광3,4호기 EDG 및 AAC 전체 신뢰도 개선

