

계통운영 보조서비스 적정비용규모 산정

마삼선, 윤용범, 안남성, 이재걸, 김현실
한국전력공사 전력연구원

Evaluation of optimum cost for power system ancillary service

Sam Sun Ma, Yong Beum Yoon, Nam Sung Ahn, Jae Gul Lee, Hyun Sii Kim
Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

Abstract - 계통운영 보조서비스는 전력계통의 안정성 확보, 전기품질 유지 및 전력거래 활성화를 위한 필수적인 서비스이다. 계통운영 보조서비스의 비용요소는 연료비, 운영유지비, 자본비용, 기회비용으로 구분된다. 이의 적정비용규모를 산정하여 보조서비스 제공자에게 보상함으로써 전력의 공급안정성 확보에 크게 기여할 수 있게 된다. 여기서는 국내 전력시장에서 연료비와 운영유지비 측면에서 적정비용규모를 산정하고 현재 운용중인 시장규칙과 비교하여 개선방안을 제시한다.

1. 서 론

전력거래가 도입된 이래 전력시장을 통하여 전력계통의 안정도를 유지하고 계통의 전압과 주파수 및 전력조류의 안정운영을 위해서는 에너지시장 이외에 별도의 계통운영보조서비스(Ancillary Service) 시장이 필요하다[1]. 현재 전력거래소는 보조서비스 운영계획에 의거하여 실적에 따라 보조서비스를 정산하고 있다. 그러나 보조서비스 확보용량에 대한 실효성 및 정산단가 등에 대한 논란이 계속되고 있고 보조서비스를 제공하는 발전사측의 불만도 줄어들지 않고 있다. 따라서 보조서비스의 정확한 요구량 산정과 보조서비스에 대한 적정원가 산정, 적정보상 수준에 대한 객관적이고 합리적인 연구가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 계통보조서비스인 주파수조정 서비스, 예비력서비스, 자체기동 서비스 중에서 가장 중요한 전력계통의 주파수를 유지하기 위한 주파수제어를 기준으로 하여 연료비변동, 유지보수 비용 및 기회비용 등을 소요원가 위주로 비용규모를 산정하여 개선방향을 모색하고자 한다.

2. 본 론

2.1 계통운영서비스 및 적정비용 산정 방법

2.1.1 계통운영보조서비스 개요

계통운영보조서비스는 전력계통의 안정성 및 신뢰성을 유지하기 위하여 이루어지는 주파수 조정, 적정 예비력의 확보, 무효전력의 수급 및 자체기동발전 등을 말한다. 현재 국내 전력시장에서 운용되는 계통운영보조서비스로는 크게 주파수조정 서비스, 예비력 서비스, 자체기동 등 3가지로 분류한다. 주파수조정 서비스는 1,000MW를 확보하며 주파수 추종운전과 자동발전 제어운전을 하게 된다. 예비력서비스는 운전상태 대기예비력으로 500 MW를, 정지상태 대기예비력으로 1,000MW를, 대체예비력으로 1,500MW를 확보하여 10분에서 2시간이내의 계통제어를 담당한다. 자체기동서비스는 광역 정전시 비상기동 전원으로써의 역할을 하게 된다. 계통운영보조서비스는 서비스 제공에 대한 적절한 보상을 통해 자발적인 참여를 유도하고자 하는 목적을 가지고 있다. 비용보상 사유로는 예비력을 제공하는 발전기에는 인센티브를 제공함으로써 비정발전기와 차별화를 할 필요가 있다. 주파수조정에 참여함으로써 추가로 소요되는 연료비, 출력변동에 따른 마모 및 유지보수비용 등을 보상해 줄 필요가 있다.

2.1.2 적정비용 산정 방법

계통운영보조서비스에 참여한 발전기는 빈번한 출력변동으로 연료비가 상승한다. 연료비 상승률을 측정하기 위하여 대표 발전기를 선정하여 Load Limit 운전상태와 Governor Free(GF) 운전상태에서 성능시험을 하여 변동률을 산정한다. 발전기는 운전상태가 변화하면 피로의 누적으로 운영유지비가 증가하게 된다. 운영유지비는 기계, 전기, 조속기 부분으로 나누어 적절한 비용을 산정한다. GF운전을 하기 위해서는 최고출력보다 낮은 여유분을 확보해야 함으로써 기회비용의 손실이 발생하게 된다. 이러한 기회비용의 원리를 살펴보고 변화 추이의 시뮬레이션으로 동향을 파악한다.

2.2 주파수조정 운전의 적정비용 산정

2.2.1 연료비 산정

전력시장개설 초기인 2000년 5월에 발전비용 산정을 위한 국내 37기 화력에 대한 특별성능시험 결과에 의하면 GF에 따른 성능저하는 평균 0.22%로 나타났다. 본 연구에서는 하동, 태안, 당진, 삼천포, 보령화력 발전소의 발전기 1기를 선정하여 GF 효율을 측정하였으며, 가스터빈발전기는 부산복합, 서인천복합, 울산복합, 분당복합, 보령복합을 선정하여 성능시험을 하였

다. 성능시험을 위해 전력거래소는 GF 효율측정 요청을 한전은 GF 효율측정 진행입회를 그리고 발전사는 GF 효율측정 계획을 수립하는 등 상호협조 아래 성능시험을 하였다. 이의 결과는 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> GF 운전에 의한 화력발전기의 효율 및 발전단가

화력발전기	효율변화(%)	발전단가(원/kwh)	비고
하동 #2	1.14	0.51	최대효율:1.32 효율:0.72 최소효율:0.04 최대단가:0.52 단가:0.29 최소단가: 0.16
태안 #4	0.31	0.19	
당진 #1	0.04	0.16	
삼천포 #6	0.72	0.17	
보령 #5	1.32	0.52	

석탄화력 발전소 GF 운전에 의한 효율변화는 석탄 발열량이나 생산지별로 원가가 달라 효율변화의 차이가 크고 발전단가 차이도 크기 때문에 몇 번의 시험으로는 밝히기가 쉽지는 않지만 측정결과의 상관도가 높은 중간값을 평균하면 효율감소치가 약 0.72%이다. 이번 결과치는 2000년에 비해 3배 이상 높은 값이다. 효율감소에 따른 추가 연료비를 산정하면 0.29원/kWh 이 된다. 가스터빈에 대한 GF운전 성능시험 결과에 의하면 <표 2>와 같이 효율감소는 미미한 수준이며 일부는 오히려 증가하는 경우도 있어 출력변동운전이 효율저하에 미치는 영향이 아주 적음을 알 수 있다.

<표 2> GF 운전에 의한 가스터빈발전기의 효율 측정결과

가스터빈발전기	효율변화(%)	비고
부산복합	+0.05	복합발전의 GF에 의한 효율변동은 아주 미미하므로 실효성이 없음
서인천복합	+0.07	
울산복합	0.04	
분당복합	0.01	
보령복합	0.09	

2.2.2 운영유지비 산정

주파수 조정운전이 발전기에 미치는 영향은 크게 기계, 전기, 조속기 부분으로 나누어 산정한다.

기계부분 운영유지비

EPR자료[1,5]에 의하면 주파수 조정운전에 의한 기기 손상비용은 제어밸브의 스로틀운전에 의해 마모, 잦은 출력변화에 의한 제어밸브 및 구동기 마모와 손상, 부분개폐 운전시 터빈 1단의 노즐, 버킷의 열피로 손상 등 3가지로 구분한다. <표 3>은 석탄화력 정비형태에 따른 소요비용을 나타낸다.

<표 3> 석탄화력의 주요부품 정비비용

설비	정비내용	비용(백만원)
HIP로터	HIP 로터 전체 교체시 가격	6,500
	HP 1단 (Control stage) Disk 도브테일 정비 (도브테일부 육성용접 재가공시)	500
HP 1단 블레이드 (Control stage Bucket)	HP1단 블레이드 (Control stage Bucket) 전체교체시	1,500
	HP1단 블레이드 (Control stage Bucket) 전체 Tenon 및 Cover 교체 및 정비	500
Control Valve	Control valve 1개 교체시 가격	1,000
	Stem, Bushing을 교체하고 Plug와 Seat 재가공시	250
	Actuator, Pilot Valve, Servo Valve등 유압계통 정비비용	10

가스터빈 발전기는 잦은 기동정지에 의한 주기운전을 시행하고 있고 주파수 조정운전보다 주기운전이 가스터빈에 미치는 손상이 크기 때문에 주파수 조정운전에 의한 손상을 정량적으로 평가하기는 쉽지않다. <표 4>는 가스터빈의 GF 운전시 손상되는 기기를 나타낸다.

〈표 4〉 가스터빈의 주파수조정운전에 의한 주요손상 부분

설비	기기	손상원인	손상
연료계통	밸브	압력변동	마모 누설
연소기	Combustion Liners Transition Piece	연소진동 온도변동	균열(연소진동) 코팅탈락 고정부마모
고온부품	Bucket Nozzle	온도변동	열피로 균열 코팅탈락

주파수조정에 의한 기계설비의 정비비용을 국내외 자료, 정비경험을 토대로 정비비용을 산출하면 석탄화력은 52.1원/MWh, 가스터빈은 87.6원/MWh로 계산되었다.

- 전기부분 운영유지비

전기기기의 수명은 재료의 열화상태에 따라 결정되므로 절연물의 수명을 평가하며 평가방법으로는 운전이력에 의한 평가, 방전도에 의한 평가방법이 있다, 주파수조정에 의한 전기기기의 손상 및 보수비용은 <표 5>와 같다.

〈표 5〉 전기기기의 손상 및 보수 비용

기기	손상위치	손상원인	손상	재건선비용
발전기	고정자 권선	열적 응력에 의한 절연열화 진행	절연파괴	50 [억원]
고압전동기	고정자 권선	열적 응력에 의한 절연열화 진행	절연파괴	15 [억원]

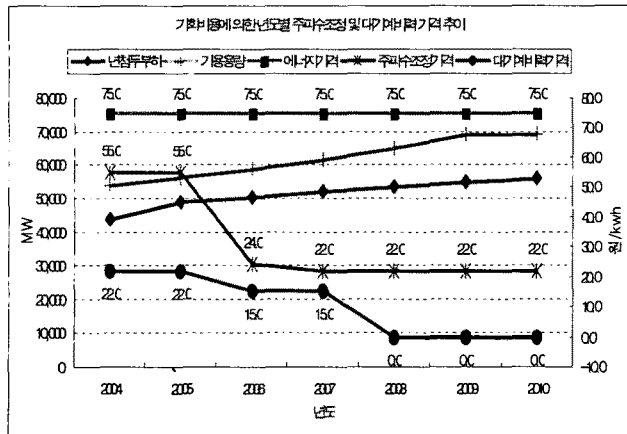
발전기 및 고압전동기의 설계수명을 30년으로 하지만 최대 예측수명이 약 49년이고 최소의 경우는 15년으로 하여 보정율 30%를 적용하면 연간 6천5백만원의 비용이 발생한 것으로 계산되었다,

- 조속기부분 운영유지비

발전설비의 조속계통은 화력발전소의 경우 증기변작동기, 유압설비, 터빈비상정지계통에 대한 정비 및 유지관리에 대한 현장자료를 바탕으로 계산하면 6년주기로 1회에 2억6천만원이 소요되는 것으로 계산되었다

2.2.3 예비력기회비용 평가

<그림 1>은 기회비용에 의한 2004-2010동안의 주파수 조정 및 대기예비력 가격추이를 나타내고 있다. 발전원 별 증분비용에 의하여 결정되는 에너지 비용은 평균적으로 75원/kWh 수준을 나타내고 있다. 이에 반하여 주파수 조정예비력 가격은 2005년까지는 55원/kWh 수준을 유지하다가 2006년의 경우 24원/kWh, 그리고 2007년 이후는 22원/kWh로 감소하는 추세를 나타내고 있다. 한편 대기예비력 가격은 2004년의 22원/kWh 기점으로 점차 감소하여 거의 0원/kWh 수준으로 떨어지는 추세를 나타내고 있다. 이는 향후 전력수요증가에 비하여 전원설비증가율이 높아짐으로 인하여 예비율이 증가하게 되고 이에 따라 예비력자원이 증가함으로 인하여 나타나는 것으로 판단된다.



〈그림 1〉 기회비용에 의한 주파수조정 및 대기예비력 가격추이

2.3 계통운영 보조서비스 적정비용 분석

주파수조정운전에 의한 가장 큰 영향은 효율감소에 따른 연료비용 증가이다. 앞에서 살펴본 바와 같이 삼천포화력 #6 경우에는 열효율 감소가 0.72% 이며 이를 연간 이용률 82%를 고려하여 연료비를 구하면 <표 6>과 같이 610,572,000원이 된다. 효율감소가 0.31%인 태안화력 #4의 경우에는 연간 연료비가 682,404,000원으로 효율감소율은 삼천포보다 적으나 연료 발열량의 영향에 의해 연료비가 증가함을 알 수 있다.

〈표 6〉 삼천포 및 태안화력 주파수 추종운전에 의한 발생비용

ASP 비용 산정	삼천포		태안		
	총액(원)	단가 (원/MWh)	총액(원)	단가 (원/MWh)	
연료비용	610,572,000	170.0	682,404,000	190.0	
운영비	기계설비	146,160,000	52.1	146,160,000	52.1
	전기설비	52,000,000	18.5	52,000,000	18.5
	조속기	35,200,000	12.5	35,200,000	12.5
합계	843,932,000	253.1	915,764,000	273.1	

주파수 조정운전에 의해 영향을 받는 기계부분의 수명에 영향을 주는 주요인자로는 온도변화에 따른 스트레스이며 이는 크게 터빈로터, HP 1단 블레이드, Control Valve 등에 영향을 미친다. 이에 대한 연간 정비비용은 <표 7>과 같다.

〈표 7〉 주요부품별 연간 정비비용

수명영향 주요부품	연간정비 비용
터빈로터	26,000,000
HP 1단 블레이드	16,700,000
Control Valve	140,000,000
합계	180,700,000

전기부분은 발전기와 주요 고압전동기 10기의 설계수명을 30년으로 했을 때 연간 발전기 한기당 비용은 65,000,000원으로 평가된다. 조속계통의 유지비용은 A급 보수가 6년 주기로 될 때 연간 비용은 약 44,000,000원으로 평가된다. 2004년을 기준으로 500MW 급 표준화력 발전소의 가동율이 80%임으로 이를 기준으로 살펴보면 삼천포 #6 경우 연간 기계설비운영에 따른 비용은 146,160,000원이며, 전기설비 운영비용은 52,000,000원, 조속계통의 운영비용은 35,200,000원으로 계산할 수 있다. 연료비용과 설비의 수명평가 및 유지비용을 모두 고려할 경우 삼천포화력 #6는 연간 주파수추종 운전에 의해 발생하는 비용의 합이 843,932,000원이며 이를 발전단가로 계산해보면 253.1원/MWh로 계산되었다. 태안화력 #4 경우에는 연간 발생비용이 915,764,000원이며 이것을 발전단가로 환산하면 273.1원/MWh이 된다. 여기서 계산한 비용은 2004년 화력발전기 평균가동율을 기준으로 계산하였기 때문에 개별발전기의 가동율은 발전기별로 다를 수 있으며 또한 실제 GF 운전시간도 가동율보다 훨씬 낮으므로 여기서 계산한 값보다 낮을 수 있다.

3. 결 론

석탄화력의 경우 주파수조정운전에 의한 효율감소는 0.4~0.8%로 예상되며 이에 따른 연료비 증가는 보조서비스의 65~70%를 차지한다. 이것을 발전단가로 환산하면 약 150~180원/MWh 이 된다. 발전기 수명감소에 따른 비용상승을 발전단가로 환산하면 약 50~70원/MWh 이 된다. 복합화력의 경우에는 가스터빈의 주파수추종운전 시험에서는 효율이 오히려 증가하는 경우도 측정되었지만 효율변동 차이가 미미한 것으로 보아 가스터빈은 주파수추종운전에 의한 연료비 감소요인은 극히 미미하다고 볼 수 있다. 그러나 가스터빈은 블레이드 등 부품의 수명이 짧아 정비 및 기계적 손실비용은 화력발전보다 약 70%이상 증가한 것으로 나타났다. 따라서 연료비는 고려되지 않았으며 주요 기계적 수명의 감소에 의한 추가 보수비용만 석탄화력보다 약 70% 상승한 MWh당 87원으로 산정되었다. 예비력 제공에 대한 기회비용은 현재 시장운영규칙상 가격결정발전계획의 발전계획량에는 포함이 되었으나 예비력지정에 의하여 차단 할당되지 않은 전력량은 기대이익(SMP와 변동비의 차)의 차로 정산하고 있어 발전기의 예비력 지정에 따른 기회비용은 COFF 비용으로 보상이 이루어지고 있다고 볼 수 있다.

전력계통의 신뢰도와 전기품질유지를 위해 계통운영서비스를 제공하고 있는 서비스 제공자에 대한 적절한 보상은 필요하다. 그러나 이번 연구에서도 나타났듯이 주파수추종운전에 대한 정확한 산정은 운전조건이나 기계적 성능에 따라서 매우 복잡하므로 단일 가격을 구하기가 대단히 어렵다. 따라서 적정가격에 대한 논쟁은 계속될 수도 있다. 이 경우 발전사의 의견에 대한 차도 있는 논의와 함께 적절한 비용산정을 위한 지속적인 연구가 필요하다[5]

〔참 고 문 헌〕

[1] EPRI, "Economics of Operating Reserve Markets", Final report, Nov. 2003
 [2] R. Viswanathan, "Damage Mechanics and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM International, 1989.
 [3] K.M. Liu, "On-line Monitoring of Life Expenditure of Steam Turbine Rotors", VGB No. 7 1988,
 [4] 전력연구원, "터빈-로터 수명예측에 관한 연구" 1987.
 [5] EPRI, "Cost of Providing Ancillary Services From Power Plants Regulation and Frequency Response", 1997