

무효전력의 변동비 산정 방법론

마삼선, 윤용범, 고경호, 정영범
한국전력공사 전력연구원

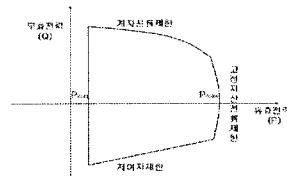
A Methodology on Variable Cost for Reactive Power

Sam Sun Ma, Yong Beum Yoon, Kyung Ho Kho, Young Bum Jung
Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

Abstract - 전력시장의 도입과 함께 그동안 전력사업자가 자체적으로 운용하였던 계통보조서비스를 이제는 각 발전사에게 할당하여 공급하는 체계가 됨에 따라 이에 대한 적절한 보상이 주요 이슈화 되고 있다. 현재 주파수제어나 예비력확보 등은 보상되고 있지만 무효전력 조정에 대해서는 아직까지 아무런 보상책이 없어 무효전력의 공급을 기피할 가능성이 있다. 그동안 무효전력의 최적비용에 대해서는 최적조류계산이나 한계송전손실계수 산정 등에 의해 각 모선별로 산정하는 방법은 연구되고 있지만 각 발전기의 변동비 측면의 접근은 실제 적용 가능한 현실적인 방법임에도 이에 대한 연구가 적었다. 여기서는 무효전력의 변동비를 산정하기 위해 손실에 따른 부가적 에너지를 구하고, 무효전력 운용 유지보수 비용 및 수명저하에 따른 비용요소를 고려한다. 이 연구방법의 특징으로는 발전기측의 자료를 사용하여 각 발전기의 무효전력 공급에 따른 변동비를 산정할 수 있어 무효전력 공급에 대한 각 발전기별 보상을 할 수 있는 방법이다.

$$P^2 + (Q + \frac{V^2}{X})^2 \leq (\frac{VE}{X})^2$$

여기서 P, Q는 유효 및 무효전력이고, X는 동기 리액턴스, V와 E는 발전기 단자전압과 계자의 최대전압에 따른 최대 내부전압이다. 윗식을 공간상에 배치하면 유효 및 무효전력은 P, Q 공간에서 나타나는 원의 내부영역에서만 공급이 가능함을 알 수 있으며 물리적 제약을 감안한 공급가능영역은 그림 1 과 같은 범위 내에 있음을 알 수 있다.



<그림 1> 동기발전기 공급 허용 가능 영역

1. 서 론

발전기의 주된 기능은 요구 부하에 대한 유효전력 공급이다. 그러나 전력계통의 교류특성상 무효전력 부하가 발생하기 때문에 주로 동기발전기가 담당하여 공급하게 된다. 유효전력은 발전비용의 최소화과 사회적 후생의 최대화라는 목적으로 능동적으로 공급되지만 무효전력은 부하의 역률, 송전망 특성, 발전기 전압 등에 의해 수동적으로 공급하고 있다. 전력계통에서 무효전력은 모선전압에 미치는 영향이 지역적이며 공급원이 다양하다는 두가지 특성을 가진다. 지역적 영향은 가까운 곳에서 공급되는 무효전력이 큰 영향력을 가지기 때문에 일부 지역적 특성에 의해 시장지배력이 발생할 수 있다. 무효전력의 공급원은 동기발전기, 동기조상기, FACTS, 무효전력보상기, 전력용 콘덴서, 리액터 등으로 다양하기 때문에 무효전력 비용을 정의하기가 매우 난해하다, 이에 대해 일부 국가에서는 동기조상기에 대해서도 비용을 인정하지만, 미국을 비롯한 대부분의 국가에서는 동기발전기의 무효전력 공급을 비용으로 인정하고 있다. 무효전력의 가격은 유효전력의 1% 정도로 알려져 있다.[1]

2. 본 론

동기발전기에서는 계자회로의 특성에 따라 발전기 내부 전압과 무효전력이 결정된다. 계자회로에서 최대허용전류는 최대 내부전압과 공급 가능한 무효전력의 범위를 결정한다. 이러한 관계를 나타내면 다음식과 같다.[4]

본 논문에서는 계통부하에 요구 따른 무효전력을 동기발전기에서 생산하는데 소요되는 변동비를 산정하며 발전기나 변압기 등의 설비투자에 따른 고정비는 고려하지 않는다. 계통설비를 설계할 때 역률은 일반적으로 0.8에서 0.9를 적용하며 역률에 따라 설비의 크기나 가격에 많은 차이가 있다. 무효전력은 역률이 1이 아닌 경우의 무효분전력으로 고압측 승압변압기 출력단자에서 측정한다. 무효전력의 변동비를 산정하는 방법으로는 무효전력에 따른 발전기 손실, 유지보수 비용, 수명감소 등의 변동비를 분석한다. 본 논문에서는 무효전력 변동비 산정에 있어 다음과 같은 가정을 한다.

- 투자 자본금은 고려하지 않고 발전기 운영의 변동비만 고려한다.
- 발전소 위험관리와 관련하여 전략적으로 준비한 예비부품은 제외한다.
- 주요 손상에 대한 유지보수 비용의 선형적인 부분만을 고려하고 장기수명에 따른 요소들은 제외하며 단기수명에 관련된 요소만 가정한다.
- 발전기 회전자 재료는 순수 구리로만 구성되어 있으며 온도상승은 저항손실과 비례한다고 가정한다.
- 보조전력은 발전기 LV 버스바에서 공급되며 버스바 전압 변화에 영향을 미치지 않는다고 가정한다.

2.1 무효전력 관련 손실

무효전력 생산에 따른 변동비는 대부분 발전기와 변압기에서 발생하는 에너지 손실에 기인한다. 역률이 1이하로 떨어지면 추가 반응전류가 유도되어 총합 전류를 증가

시켜 $I^2 R$ 에 의해 열이 발생하고, 교류전류에 의한 표류 순환전류(Eddy Current)가 회전자에서 발생한다. 여기서 발전기 로타의 여자손실은 성격이 다르다. 전상역률에서는 발전기 로타 여자손실은 손실 곡선의 역률 조건과는 비대칭적으로 감소하는 경향이 있다. 반면에 지상역률에서는 여자전류가 현저하게 증가하며 손실이 늘어난다. 무효전력에 의한 발전기, 변압기, 여자기 등의 손실은 일반적으로 전부하의 2% 정도로 매우 적은 값[2]이기 때문에 추정 오차를 감안 할 때 정확하게 측정하는 것은 어렵다. 무효전력 관련 손실에 대한 비용을 계산하는 방법으로는 다음과 같은 방법을 생각할 수 있다. 부분부하에서 발전기의 출력은 계통의 요구와 일치하기 때문에 유효전력에 대한 연료소비량을 먼저 산정한다. 동일 조건에서 무효전력을 생산하여 부가적으로 소요되는 연료량을 계산하여 두 값의 차를 구한다. 한편 발전기 전 부하 운전에서는 부가전력까지 발전기 전부하 구매가격에 포함되어 부가적 손실을 고려할 수 없기 때문에 부가전력에 대한 비용을 산정하기가 어렵다. 단순계통에서 이러한 주장이 가능하나 실제로는 부가전력 만큼 다 발전기가 부담하게 된다, 무효전력 관련 에너지 손실은 발전기에서 부가적 손실을 말하며 발전기 수입과 관련이 있는 유효전력과는 다르기 때문에 무효전력에 의한 손실은 발전기 수입과 무관하다.

2.2 유지보수 비용

전형적인 유지보수 비용은 경상정비나 정기정비에 관련된 비용을 고려한다. 랜덤하게 발생하는 불시 사고에 대해서는 비용을 예상하기가 어렵다. 따라서 유지보수 및 정비이력을 근거하여 발전기 규모와 무효전력 크기를 고려하여 비용을 예상한다. 과거정비 이력자료를 바탕으로 하여 무효전력이 영향을 미치는 유지보수 비용요소를 구하는 방법의 일례로 발전기의 냉각가스가 냉각수쪽으로 누설이 되면 회전자 단부의 진동이 증가하게 되는 경우이다. 여기서 회전자 단부의 진동은 계자전류 I^2 과 비례한다. 또한 I^2 은 $MW^2 + MVAR^2$ 에 비례하게 때문에 무효전력의 비용은 $MVAR^2 / (MW^2 + MVAR^2)$ 가 된다. 여기서 유지(Maintenance)와 보수(Repair) 그리고 정년열화(Plant Aging) 비용에 대해서는 정의할 필요가 있다. 유지비용은 프랜트를 신뢰적으로 운영하기 위한 최적 비용이다. 보수는 경상보수가 아닌 보수로써 중요설비의 부품의 교체나 일반설비의 교체 등을 말한다. 발전기 정년열화는 부분적인 보수에 의해서 주요 부품의 신뢰도를 확보할 수 없어 교체가 필요한 경우를 말한다.

2.3 발전기 정년열화

보수와 정년열화를 명확히 구분하기는 쉽지 않으나 위에서 살펴본 것처럼 정년열화는 발전기 로타의 교체나 발전기 재권선 등 주요한 부분에 대한 보수가 필요한 경우를 의미한다. 정년열화에 대한 무효전력 관련 비용은 단위 역률로 운전했을 경우 부품의 교체 연간기대 가격과 특정 무효전력을 생산 시 동부품의 교체 현가와의 차이를 말한다. 발전기 부품의 사고확률이 <표 1>과 같을 때 단위역률로 운전시 가용도를 기준으로 MTBF(Mean Time Between Failures)를 구하면 가용도(Availability) $= (1-0.01)(1-0.007)(1-0.015)(1-0.008) = 0.9606$ 이고, $MTBF = 1/(1-0.9606) = 25$ 년이 된다. 만일 무효전력이 0 인 경우 계자전류가 2.3 p.u이고, 무효전력 발생시 계자전류가 3.6 p.u이면 가용도는 다음과 같이 계산한다.

<표 1> 발전기 부품 사고확률

손상 모드	영향인자	사고확률	MTBF(년)
로타 권선 채곡	전류	0.01	100
단조부위 크랙	-	0.007	143
내부권선 손상	전류	0.015	67
철연파괴	-	0.008	125

$$(1-0.01 \times (3.3/2.3)^2)(1-0.007)(1-0.015 \times (3.3/2.3)^2)(1-0.008) = 0.935$$

이 경우 $MTBF = 1/(1-0.935) = 15.38$ 년으로 수명이 약 9.5년이 단축된다. 이와같이 발전기의 정년열화도 무효전력 생산시 발생하는 순환전류에 의한 큰 영향을 받는다.

2.4 무효전력 가격산정 방법

무효전력 변동비용을 산정하는 방법의 개요를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 발전기와 변압기 자료 확보
 - 손실, 유지비용, 보수비용, 교체비용 등
- 2) 변동비용 비교분석 분석(손실, 유지보수, 교체비용)
 - 유효전력과 무효전력 비용 산정한 후
 - 유효전력만의 비용을 산정하여 비교한다.
- 3) 단위역률에서 운전하는 경우 유효전력 생산비용과 역률 1 이하에서 운전하는 경우 무효전력 생산비용 차이를 구한다.
- 4) 위의 과정을 주어진 조건하에서 반복 계산한다.

위에서 제시한 가격산정방법에 의거하여 무효전력의 비용요소를 계산하는 과정을 살펴보면 다음과 같다.

[예제] 정격용량이 300MW, 22Kv이고 고정자 권선의 저항이 0.0025 ohm인 발전기가 전 부하에서 역률 0.85로 운전된다. 발전기 전체 효율이 36%이고 연료비는 20원/MJ이다. 이발전기의 유지보수 이력에 의하면 진동 영향에 의해 고정자 권선 단부의 고정부분이 헐거워져 이를 보수하는데 부가적인 비용이 1년간 운전시 30,000천원/년으로 가정한다.

위와 같은 제한적 정보를 바탕으로 하여 무효전력 발생과 관련된 고정자 단부권선 부분의 문제에 대한 유지보수 비용은 다음과 같이 산정할 수 있다.

먼저 무효전력 생산에 드는 연료비를 계산한다.

- 정상부하(역률 0.85)에서 고정자 권선 손실

$$3 \times 0.0025 \times [300 \times 10^4 / (0.85 \times \sqrt{3} \times 22000)]^2 = 643 \text{ kW}$$

- 단위역률(역률 1)에서 고정자 권선 손실

$$3 \times 0.0025 \times [300 \times 10^4 / (1.0 \times \sqrt{3} \times 22000)]^2 = 465 \text{ kW}$$

- 무효전력 생산에 의한 고정자 손실

$$643 \text{ kW} - 465 \text{ kW} = 178 \text{ kW}$$

- 무효전력 생산에 따른 부가적 연료사용량

$$178 \times 10^3 \text{ W} \times 3.15 \times 10^7 \text{ 초/년} \times (100/36\%) = 1.56 \times 10^7 \text{ MJ/년}$$

- 무효전력 생산에 따른 부가적 연료비용

$$1.56 \times 10^7 \text{ MJ/년} \times 20 \text{ 원/MJ/1000} = 31,200 \text{ 천원/년}$$

다음으로 유지보수 비용을 산정하기 위해 고정자 단부 누설함을 유발하는 진동 원인을 분석한다. 고정자 단부는 전자기적 진동의 영향을 받으며, 전자기적 진동은 여자전류와 누설자속과 밀접한 관계가 있어 고정자 단부의 진동은 전류의 제곱과 비례한다. 따라서 무효전력의 증가는

발전기의 수명에 영향을 주며 보수 주기를 단축시킨다. 발전기 손상의 주요원인이 전류의 제곱과 연관이 있으므로 먼저 운전기간 동안의 손상과 수리비를 산정하기 위해서는 Amp² hour을 구한다. 그리고 손상이 적은 단위역률에서의 Amp² hour을 구하여 비교한다.

- 무효 전력발생시 발전기가 년간 받는 I²의 영향에 의한 총 누적량
 $[300 \times 10^6 / (0.85 \times \sqrt{3} \times 22000)]^2 \times 8760 = 7.5 \times 10^{11}$ Amp² h
 our/year

- 단부 수리와 관련된 A²hr 비용
 $30,000 \text{천원/년} / 7.5 \times 10^{11} \text{ A}^2\text{hr/year} = 4 \times 10^{-5} \text{ A}^2\text{hr/year}$

- 단위역률로 운전 시 발전기가 년간 받는 I²의 영향에 의한 총 누적량
 $[300 \times 10^6 / (1.0 \times \sqrt{3} \times 22000)]^2 \times 8760 = 5.4 \times 10^{11}$ Amp²
 hour/year

- 무효전력 발생에 따른 추가적 A²hr
 $(7.5 - 5.4) \times 10^{11} \text{ A}^2\text{hr} = 2.1 \times 10^{11} \text{ A}^2\text{hr/year}$
 - 무효전력에 의한 고정자 단부 수리비용
 $2.1 \times 10^{11} \text{ A}^2\text{hr/year} \times 4 \times 10^{-5} \text{ A}^2\text{hr/year} = 8,100$
 천원/년

실제적 방법론이 되기 위해서는 보다 복잡하고 정확한 자료를 확보할수록 좋으나 현실적으로는 자료획득에 많은 시간과 노력이 소요되어 설계사양 및 운전이력을 많이 사용한다.

2.5 무효전력 가격산정을 위한 필요 자료

무효전력 생산에 따른 변동비용을 산정하기 위한 자료로는 발전기자료, 유지관리 이력, 보수 및 교체 이력과 함께 운전 자료가 필요하다.

- 발전기 자료로는 규정 부하, 규정 전압, 규정 부하률, 전부하 효율 및 발전기 냉각방식
- 규정 전압에서 로타 여자 개회로 전류
- 발전기 d-축 동기 리액턴스, d-축 sub-transient 리액턴스, q-축 리액턴스
- 정규출력에서 로타 계자 전류
- 변압기 규정용량, 규정 저압라인 전압, 규정 고압라인 전압, 공칭 리액턴스, 전부하 효율
- 정상보수 비용
- 유지보수 이력
- 연료가격
- 발전소 종합 열효율 등의 발전소 자료가 필요하다.

한편 무효전력 생산 운전시 발생하는 에너지 손실을 산정하기 위해서는 다음과 같은 자료가 필요하다.

- 고정자의 냉각수 온도
- 정규 출력에서 회전자 평균온도
- 로타 회전자 및 고정자 지향
- 발전기 손실 : 고정자 I²R 손실, 계자전류 손실, 표류 전류 손실, 저항 및 풍손
- 변압기 고정손실 및 부분부하 손실

의 자료로부터 단위 역률에서의 운전실적과 규정역률의 운전실적을 비교하여 무효전력 생산 비용을 산정한다.

3. 결 론

전력산업의 경쟁체제의 도입으로 발전부문의 경쟁에 따른 신규 진입자의 증가로 인한 경영의 투명화와 합리적 도매가격 형성 등 긍정적인 측면도 있으나, 전력계통의 안정적인 운영을 위한 전압유지와 무효 전력공급 등 몇가

지 부분에서는 아직도 보완이 필요한 실정이다. 경쟁시스템을 유지해가는 가장 중요한 기제인 인센티브는 계통의 신뢰도 유지 노력에 대한 기여도를 산정해야 지급이 가능하나 무효전력생산과 관련된 각 발전기별 비효율성에 대한 자료가 적절치 않아 보상에 어려움을 겪고 있다. 따라서 각 발전기별 기여도를 산정하기 위한 기본적인 방법을 본 논문에서 제시하였다. 유지보수에 소요되는 비용의 산정에는 발전기의 결합과 사고의 유형에 대한 정확한 분석이 필요하나 이는 확실적인 문제로서 정확한 값을 얻는데 한계가 있어 과거이력이나 경험을 바탕으로 사고 유형 및 발생 빈도를 가정하여 사용하였다. 무효전력의 계산에서는 일정한 값을 지정하여 계산을 하였으나, 현실적으로는 하루 중에도 진상운전과 지상운전을 번갈아 가며 운영되기 때문에 전체를 합산한 후 평균하여 사용하는 방법도 고려할 수 있다. 무효전력 생산에 따른 각 발전기별의 영향을 간단하게 모델링하여 비용을 쉽게 산정함으로써 시장에서 보상에 대한 합의의 도출도 용이할 것으로 보인다. 선행연구[6]들은 최적 조류법 산정방법을 이용하여 주로 계통에서 필요한 무효전력의 량을 구하여 계통 전체의 신뢰도 측면을 고려했다면 본 방법은 각 발전기의 무효전력유용에 따른 비용을 분석했다는 점이 다르다고 볼 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] EPRI, "Cost of Providing Ancillary Services from Power Plants", TR-107270-V2 4162, April. 1997
- [2] G. Gross, S. Tao, E Bompard, G. Chicco, "Unbundled Reactive Support Service" IEEE Trans on Power Systems, Vol 17, No. 2, May 2002.
- [3] 박종배, 이기승, 신중린, 김성수, "무효전력을 고려한 한계송전손실계수 산정 방법론개발 및 현물시장에의 적용", 전기학회논문지 52A-7-11, 2003
- [4] 이광호, "무효전력 기회비용을 반영한 전력시장 입찰 전략 연구" 전기학회논문지 53A호 2004.
- [5] 정춘식, 박정도, 문영현, "무효전력 비용 산정에 관한 연구" 전기학회논문지 53A-3-8, 2004.
- [6] 이승렬, 이병준, 송태용, 정민화, 문영환, "전력산업 구조개편 환경하에서 무효전력 보조서비스 운용을 위한 최적조류 계산법 개발" 전기학회논문지 51A-1-6, 2001.