

## 무효전력보상장치 설치가 900 MW 복합화력발전소의 성능향상에 미치는 효과

이영옥\*, 유호선\*\*†

\*한국서부발전 \*\*† 대한기계설비산업연구원

### Effect of the Reactive Power Compensation System on Performance Enhancement in a 900 MW Combined Cycle Power Plant

Young Ok Lee\*, Hoseon Yoo\*\*†

\*Korea Western Power Corporation

\*\*† KRIMFI

**ABSTRACT** : In the case of a 900 MW combined cycle power plant, most of the load on the site is a rotating device and is operated at a low power factor, and the power factor decrease increases the reactive power, which causes the efficiency of the device to be consumed and unnecessary unnecessary power consumption. This study intends to present the results by installing and operating a reactive power compensation device that absorbs and removes reactive power, which is a solution to this problem, on a 6.9 kV on-board bus. As a result of application of this system, first, it was confirmed that the power factor of the rotating machine was improved to 0.22 and the load power in the house was reduced by 1.4%, and the thermal efficiency of the generator was increased by 0.1% and the power generation power by 810 kW. Next, it was confirmed that the cost of construction and operation can be reduced in the future due to economic feasibility, with a decrease of 200 million won/year in electricity loss compared to 1.5 billion won in investment, an increase of 1 billion won/year in sales, and a one-year capital recovery period.

**초록** : 900 MW 복합화력발전소의 경우 소내 부하의 대부분은 회전기기이며 저역률로 운전되고 있고 역률 저하는 무효전력을 증가시켜 기기의 효율 저하 및 불필요한 소내 전력을 소비하는 원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안인 무효전력을 흡수 및 제거하는 무효전력보상장치를 6.9 kV 소내 모선에 설치하여 운전함으로써 그에 대한 결과를 제시하고자 한다. 본 시스템의 적용 결과 우선 회전기기의 역률이 0.22로 개선 및 소내 부하전력량 1.4% 감소됨을 확인하였고 발전기 열효율 0.1%, 발전출력 810 kW 증가함을 알 수 있었다. 다음으로 투자비 1.5억 원 대비 소내 전력손실비용 2억 원/년 감소 및 매출액 10억 원/년 증가로 경제성 있음으로 분석되었고 향후 건설 및 운영 시 비용절감이 가능함을 확인하였다.

**Key words** : Reactive Power Compensation Device(무효전력보상장치), Power Factor Improvement(역률개선), Internal Power(소내전력), Generator Thermal Efficiency (발전기 열효율), Economic Feasibility (경제성)

Corresponding Author, hsyoo@ssu.ac.kr

# 무효전력보상장치 설치가 900 MW 복합화력발전소의 성능향상에 미치는 효과

## -기호설명-

C : 열효율 보정계수  
HHV : 발열량 (kcal/kg)

k : 출력보정계수  
m : 연료량 (kg/h)

W : 출력 (kW)  
η : 열효율 (%)

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

가스복합발전 총 1177 MVA급 가스터빈, 증기터빈 발전기의 경우 발전단 출력 900 MW 기준 12 MW를 소내 부하로 사용하고 있으며, 소내 부하는 대부분 유도성 부하로 77~78% 저역률로 운전되고 있다. 여기서 역률이란 피상전력에 대한 유효전력의 비율로 보통 코일성분이 많은 회전기기일수록 역률이 낮다. 역률이 저하되면 무효전력이 증가하여 회전기기의 효율 및 수명을 저하시키게 된다.

또한 발전기는 무효전력 생산량이 아주 크며 이 무효전력은 발전기 계자전류의 증가 및 권선온도를 높여 발전 열효율 및 성능저하를 발생시킨다.

일반적으로 무효전력보상장치는 전력계통의 수전단에 설치하여 수전단 부하의 역률개선을 선로 손실감소와 수전단 전압개선에 사용하여 동시에 부하단 변압기를 설비용량 한계까지 사용함으로써 유효전력 부하의 증대사용 효과에 주로 사용한다.

그러나 발전소에서는 무효전력으로 인한 발전 손실에 대한 대책이 전무한 상황이고 회전기기의 경우 무효전력 손실을 반영하여 설비크기를 불필요하게 증대하여 제작하고 있는 실정이다.

이에 본 논문에서는 발전기 운전 중 보조변압기를 통하여 공급되는 6.9 kV 소내 모선에 무효전력보상장치를 설치하여 운전, 정지시 무효전력보상장치의 발전소 성능향상에 대한 효과를 분석하고자 한다.

### 1.2 연구내용 개요

무효전력보상장치의 적용 및 효과 분석을 위하여, 900 MW 펄스 복합화력발전소의 가스터빈발전기의 6.9 kV 소내 모선 2개소를 대상으로 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기존 소내 모선에 무효전력보상장치를 회전기기들과 병렬로 설치하여 운전 및 정지 시에 따른 회전

기기의 역률, 소내 소비전력, 발전기 열효율 및 발전출력 효과를 분석하였으며, 이를 위하여 아래와 같은 순서로 연구를 수행하였다.

첫 번째, 무효전력보상장치의 제작을 위해 소내 모선의 고압차단기 운전 및 차단용량을 확인하였으며 운전 중인 회전기기들의 영향을 최소화하기 위해 보호계전기 정정도 병행하여 시행하였다.

두 번째, 회전기기의 역률, 소내 소비전력, 발전기 열효율 및 발전출력 측정을 위하여, 중앙제어실에 설치되어 있는 전력설비감시제어시스템(Electrical Control & Measurement System, 이하 ECMS)을 활용하였으며 무효전력보상장치의 운전 및 정지 시 효과 분석을 위해 발전출력 고정운전 후 시간대별 측정값을 취득한 후 연구를 수행하였다.

세 번째, 소내 소비전력 감소량, 발전기 열효율 및 발전출력 상승분에 대해 전력판매 단가를 적용하여 절감 금액과 매출액을 산출하고 무효전력보상장치 적용 시 발생한 투자비를 감안하여 내부수익률, 순현재가치, 비용편익비 및 자본 회수기간과 같은 경제적 효과 분석을 시행하였다.

## 2. 무효전력보상장치 설치

### 2.1 장치특성 및 원리

무효전력보상장치는 일반적으로 차단기식 무효전력보상장치를 많이 사용한다. 하지만 이 장치를 발전소 내에 설치할 경우 차단기 동작 시 발생하는 돌입전류 및 스위칭 시 발생하는 서지의 영향으로 커패시터 및 리액터의 소손이 발생할 수 있다. 이에 전자식 무효전력보상장치를 설치하여 차단기 동작 시 발생하는 단점을 해결할 수 있다.

전자식 무효전력보상장치로 주로 이용하는 대표적인 설비는 정지형 무효전력보상장치(Static Var Compensator, 이하 SVC)이다. SVC의 설치효과는 전압조정, 전압안정화, 과도안정도 향상 및 전력계통의 진동억제가 있다. SVC는 커

패시터를 Zero-Crossing하는 무효전력생성장치 (Thyristor Switched Capacitor, 이하 TSC)와 리액터의 위상제어 및 Zero-Crossing을 하는 무효전력흡수장치 (Thyristor Switched Reactor, 이하 TSR) 방식이 있다. 상호 병렬로 구성되어 있으며 진상분이 필요한 경우에는 TSC가 동작을 하고 지상분이 필요할 경우에는 TCR이 동작을 하며 설계에 따라 TSC는 고정으로 운전하고 TCR의 용량을 조정하여 운전할 수도 있다.

TCR은 두 개의 리액터를 직렬로 구성하고 그 사이에 사이리스터 스위치가 연결된 방식으로 구성되어 있으며 점호각을 제어하여 리액터에 공급되는 전류 값을 조정한다. 반대성분을 가지는 커패시터는 사이리스터 스위치와 이에 직렬로 연결된 커패시터로 구성되어 있고 계통과 동기시켜 모선전압이 최대인 순간에 스위치를 동작시켜 진상 무효전류를 공급한다.

본 연구에서 무효전력보상장치 설치 시 성능효과에 대한 분석은 TSC 타입의 SVC를 적용하고자 한다.

## 2.2 설치대상 발전소

본 연구의 실증 대상인 한국서부발전(주) 평택발전본부는 경기도 평택시 포승면 남양만로 175-2에 위치하며 성능시험 대상인 평택복합 2호기는 발전용량 900 MW로 증기터빈 1대, 가스터빈 2대로 운전되는 복합발전설비이다. 설치 위치는 Fig 2-1과 같이 6.9 kV 모선에 병렬로 설치하였다.

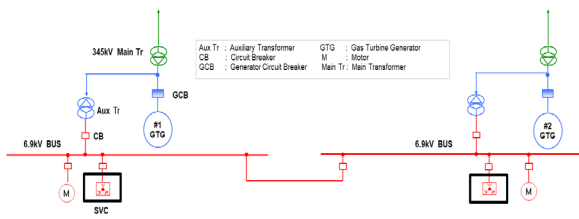


Fig. 2-1 Installation location of static var compensator

## 2.3 성능시험 조건 및 방법

본 시험은 발전소 내 6.9 kV 모선에 설치된 무효전력보상장치의 운전, 정지 시 회전기기의 역률과 소내 전력을 측정하고 대기온도, 대기압력, 발전기 역률, 복수기 진공도 등의

보정항목을 반영한 발전출력 및 가스 연료량 변화추이를 측정하여 개별 상태의 발전기 효율을 비교하고자 한다.

측정 장소는 주제어실이며 데이터 측정 시간은 10시~12시, 14시~16시까지의 1시간 간격으로 무효전력보상장치의 투입, 차단 시 측정값만 적용하고 발전단 출력 기준으로 복합발전 총 출력은 900 MW로 유지하는 부하제한 운전방식을 채택하고, 가스터빈 2대의 발전전압은 각각 19.85 kV, 20.05 kV로 고정시킨다.

송전출력, 발전출력, 발전기 역률 측정값은 전력설비감시제어시스템의 기록 평균치를 적용하고 연료사용량과 발열량은 한국가스공사 데이터 기준[2]으로 한다.

발전단 열효율 시험의 경우 평택복합 2호기 인수성능시험시 협의된 효율 측정 방법[3]에 준하여 수행하였다.

우선 가스터빈 발전기 2대에서 측정된 복합 출력은 식 (2-1)과 같이 계산한다

$$W_{cc,m} = W_{GT1,m} + W_{GT2,m} \quad (2-1)$$

여기서  $W_{\alpha(m)}$ 는 복합 출력 측정값이고  $W_{GT1(m)}$ 와  $W_{GT2(m)}$ 는 가스터빈발전기의 개별 출력 측정값이다.

다음으로 복합 출력의 측정값에 대한 보정출력은 측정된 출력과 발전기 역률의 영향으로 발생한 출력의 합에, 그 외 영향을 미치는 경계 밖의 외적인 조건 중 제작사가 제시한 항목들에 대하여 표준조건으로 보정하는 보정계수를 곱하여 구한다. 다만 시험의 편의상 아래 보정항목을 모두 사용하지는 않고 대기온도, 대기압력, 발전기 역률, 복수기 진공도 항목만 사용하고 나머지 보정계수는 1로 간주한 후 식 (2-2)와 같이 계산한다.

$$W_{cc,c} = (W_{cc,m} + k) / k \quad (2-2)$$

여기서  $W_{cc(c)}$ 는 보정된 복합 출력이고  $k$ 는 출력 보정계수이다.

복합 열효율을 계산하는 공식은 다음과 같으며 연료의 발열량은 한국가스공사에서 제공하는 시간당 에너지량을 적용하여 계산한다.

$$\eta_{cc,m} = \frac{W_{cc,m} \times 860}{(m_{GT1,m} + m_{GT2,m}) \times HHV} \times 100 \quad (2-3)$$

여기서  $\eta_{\alpha(m)}$ 는 복합 열효율 측정값이고  $m_{GT1,2,m}$ 는 가스터빈 연료량이며  $HHV$ 는 연료의 발열량을 의미한다.

## 무효전력보상장치 설치가 900 MW 복합화력발전소의 성능향상에 미치는 효과

복합 열효율 보정값은 복합 열효율 측정값이 도출된 후 복합 출력 보정값 계산 시와 동일하게 시험의 편의상 모든 보정항목을 적용하지 않고 대기온도, 대기압력, 발전기 역률, 복수기 진공도 항목만 사용하고 나머지 보정계수는 1로 간주한다.

$$\eta_{cc,c} = \frac{(W_{GT1,m} + W_{GT2,m} + k_{GT1,m} + k_{GT2,m}) \times 860}{(m_{GT1,m} + m_{GT2,m}) \times HHV \times C} \times 100 \quad (2-4)$$

여기서  $\eta_{a,c,GT1,2,m}$ 는 가스터빈발전기 2대의 열효율 보정값이며  $C$ 는 열효율 보정계수이다.

발전단 열효율 계산 시 보정항목에 대한 보정방식은 계산 및 보정곡선에 의한 보정계수를 적용하고 대기압력 101.325 kPa, 대기온도 15°C, 발전기 역률 0.95는 표준값을 적용하였다.

### 3. 성능향상 분석 및 고찰

#### 3.1 회전기기 역률

무효전력보상장치의 현장 적용 시험기간 중 무효전력보상장치의 투입 및 차단시 회전기기의 역률과 소내 전력량에 대하여 분석하였다.

역률 측정값은 회전기기의 고압차단기 계기용변압기(7.2 kV/120 V) 및 계기용변류기(300/5 A)를 입력 값으로 하는 전력량계를 설치하여 측정하였으며 무효전력보상장치 인입 차단기 조작을 통하여 시간대별 투입과 차단을 반복하여 측정값을 기록하였다.

첫 번째, 가스터빈발전기는 무효전력보상장치의 운전과 정지 시 역률값이 각각 평균 0.99, 0.76 측정되었고 나머지 가스터빈발전기는 각각 1.00, 0.81로 측정되었다.

Fig 3-1은 두 가스터빈발전기의 측정된 역률값의 계산 평균을 나타내며 각각 1.00, 0.78로 약 0.22 개선되었음을 확인할 수 있었다.

소내 전력감소량 분석에 앞서 900 MW 복합화력발전소의 경우 소내 부하전력은 가스터빈발전기 2대에서 생산된 발전출력의 약 12 MW를 별도로 인출하여 사용하고 있음을 인지할 필요가 있다.

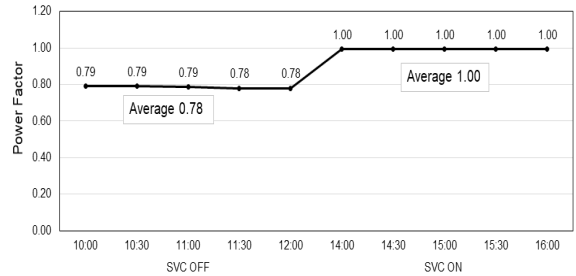


Fig. 3-1 Power factor by static var compensator

두 번째, Fig 3-2는 무효전력보상장치 운전과 정지 시 소내 전력량을 나타내며 운전 시 평균 12,436 kW, 정지 시 12,603 kW로 무효전력보상장치 적용 시 167 kW 전력이 감소하였음을 보여준다. 이는 총 소내 부하전력량이 12 MW임을 감안하면 1.4%로 절감은 발전소 내 효율 향상에 기여할 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이 회전기기들의 무효전력을 무효전력보상장치가 흡수 및 제거하여 기기들의 소비전력량을 감소시켰으며 회전기기들의 열 발생의 원인 중의 하나인 무효전력이 제거됨으로써 효율과 수명이 증가함을 유추할 수 있다.

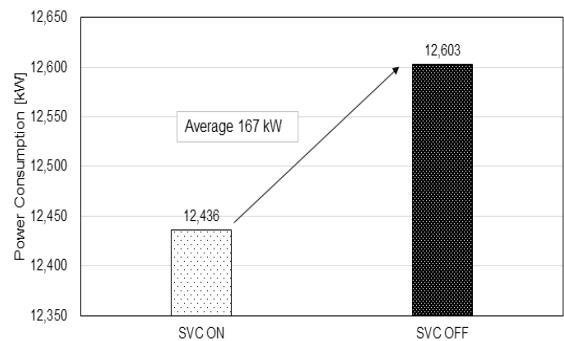


Fig. 3-2 Reduced power consumption factor by static var compensator

#### 3.2 열효율 및 발전출력

측정 및 계산 값들은 열효율을 측정하기 위해 대기온도 15°C, 대기압력 101.325 kPa 고정으로 설정하고 900 MW 발전 출력 시 무효전력보상장치 운전과 정지를 통해 얻어진

값이다.

단 전체 발전출력량을 고정시킬 경우 주변 온도 및 압력에 따라서 가스터빈발전기와 증기터빈발전기의 발전 분담이 달라지고 그 상관관계를 알기 어려우므로 공급 가스 량을 사용하여 발전되는 가스터빈발전기 2대의 출력만을 고려하여 발전효율을 계산한다.

가스터빈발전기 2대의 발전출력량은 발전기 역률 0.95로 계산하여 보정한 것이며 효율 값은 가스터빈발전기 주변 온도 압력 값의 보정계수 전체를 곱하여 한 번에 보정한 값이다.

Fig 3-3은 가스터빈발전기 2대의 열효율이 3.68%에서 36.77%로 약 0.09% 상승하였고 이는 발전출력으로 보정하였을 경우 약 810 kW 향상되었음을 보여 준다.

이는 발전출력의 무효전력 성분을 무효전력보상장치가 흡수하여 제거함으로써 발전기 출력을 조정하는 발전기 계자전류를 감소시키고 감소된 전류만큼 발전기 내부에서 발생하는 코일의 온도를 감소시킨다. 감소된 온도만큼 발전기 열효율이 증가되고 결과적으로 발전출력을 향상시킬 수 있음을 의미한다.

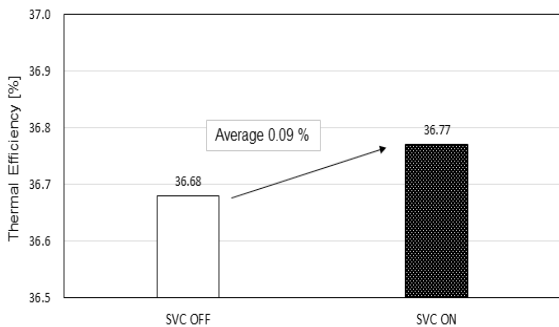


Fig. 3-3 Power generation efficiency by static var compensator

### 3.3 경제성

무효전력보상장치 적용 시 유형효과 분석을 위해 제 20-1 차 전력시장운영규칙[1]을 참고하였으며 2019년 250 MW 서인천 복합화력발전소의 전력 거래 시 전력판매단가를 기준으로 경제성 분석을 하고자 한다.

우선 무효전력보상장치 적용 시 투자비 1억 5천만 원 대

비 소내 전력 감소에 따른 년 간 절감금액은 소내전력 감소량 167 kW, 단가 140 원/kWh 기준으로 2억 원이고, 열효율 상승에 따른 발전출력 향상으로 년 간 판매금액은 발전출력 상승량 810 kW, 단가 140 원/kWh 기준, 10억 원으로 전력손실 감소비용 2억 원. 매출액 10억 원/년 증가가 발생함을 알 수 있다. 이러한 매출이익은 250 MW 복합화력발전소 1개 호기 기준 전력판매수익 1,500억 원/년의 약 0.7%에 해당된다.

그 결과 경제성은 운영기간을 15년으로 보고, 법인세율 24.5%, 보험료 0.0848%, 수선유지비 1.1%, 할인을 7%를 적용하면 내부수익률 867%, 순현재가치 80억 원, 비용편익비 79.23이며, 투자비 회수기간은 1년으로 경제성이 있음으로 분석되었고 향후 건설 및 운영 시 비용절감이 가능할 것으로 예상된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 평택에 위치한 900 MW 복합화력발전소의 6.9 kV 소내 모선에 무효전력보상장치를 설치하고 운전함으로써 발전소 성능 향상에 미치는 효과를 분석하여 얻은 핵심 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 장치의 적용으로 소내 회전기기의 역률이 0.22로 개선 및 소내 부하전력량 1.4% 감소됨을 확인하였다. 역률의 증가는 기기 효율을 높이고 총 소내 부하전력량을 감소시켜 발전소 전체 효율 향상에 기여하였다.
- (2) 발전기 열효율은 0.1%, 발전출력 810 kW 증가됨을 확인하였다. 이는 발전기 계자전류와 코일의 온도를 감소시켜 발전기 열효율 및 발전출력을 향상시킬 수 있음을 나타낸다
- (3) 투자비 1.5억 원 대비 소내 전력손실비용 2억 원/년 감소 및 매출액 10억 원/년 증가가 발생함을 확인하였다. 이는 내부수익률 867%, 순현재가치 80억 원, 비용편익비 79.23, 자본 회수기간 1년으로 경제성 있음으로 분석되어 건설 및 운영 시 비용절감이 가능할 것으로 예상된다.

## 무효전력보상장치 설치가 900 MW 복합화력발전소의 성능향상에 미치는 효과

따라서 소내 모선에 무효전력보상장치를 적용한 결과 복합화력발전소의 성능향상에 기여하고 있음을 확인할 수 있었다. 향후 무효전력보상장치의 운전을 시간대별 소내 부하량에 따른 소내 전력과 발전출력을 확인하여 본 장치의 적절한 운전시간을 연구하는 것이 필요해 보인다.

### 참고문헌

- (1) 한국전력거래소, 2020년, 전력시장운영규칙, pp. 43-45
- (2) 가스공사, 2015년, Natural Gas 성분분석표
- (3) 복합화력발전소, 2015년, 2호기 인수성능시험 효율 측정방법 