

# ICT 기반 에너지 절감을 위한 3상 3선식 무효전력 조정장치 개발

박승현, 김재하, 권기웅, 김용호

한국전자기술연구원

{park.seunghyeon, jaeha8888, kiwoong.kwon, yhkim}@keti.re.kr

## Development of an ICT-Based Reactive Power Control Device

Seunghyeon Park, Jaeha Kim, Kiwoong Kwon, and Yongho Kim

Korea Electronics Technology Institute

### 요약

본 논문에서는 산업용 저압 전력계통에서 전력 손실 저감과 에너지 비용 절감을 목적으로 개발된 ICT 기반 무효전력 조정장치를 제안한다. 제안된 장치는 3상 4선식 계통에 적용 가능하도록 설계되었으며, 전압·전류 계측, 제어 알고리즘, 전력변환 모듈을 통합하여 계통 상태 변화에 따라 무효전력을 능동적으로 제어한다. 이를 통해 불필요한 무효전력 흐름을 저감하고, 역률 개선을 통한 손실 감소가 가능하도록 하였다. 장치의 성능은 공인 시험기관을 통해 평가되었으며, 유도성 및 용량성 조건에서 각각 평균 16.03[%p], 27.82[%p]의 역률 개선 효과를 확인하였다. 또한 무효전력 제어는 제어 시 평균 12.66[s] 이내에 목표 상태에 도달하였으며, 전압 왜형률(THD)은 모든 조건에서 평균 5[%] 이내로 유지되었다. 본 연구는 ICT 융합 관점에서 무효전력 제어를 활용한 에너지 절감형 전력 관리 기술의 가능성을 제시한다.

### I. 서론

산업 설비, 상업용 빌딩, 데이터센터와 같은 에너지 다소비 환경에서는 전력 사용량뿐만 아니라 전력 손실과 불필요한 에너지 소비가 운영 비용 증가의 주요 원인으로 작용한다. 특히 무효전력 증가는 송·배전 손실을 증가시키고 설비 이용률을 저하시켜, 동일한 유효전력을 공급하기 위해 더 많은 전력을 소비하게 만든다.

기존의 무효전력 관리는 콘덴서 뱅크와 같은 수동형 설비에 의존해 왔으나, 이러한 방식은 부하 변화에 능동적으로 대응하기 어렵고 실제 에너지 절감 효과를 정밀하게 관리하는 데 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 센서, 제어, 통신 기술을 결합한 ICT 기반 에너지 절감 기술이 주목받고 있으며, 배전계통 및 저압 계통에서 인버터 기반 Volt/VAR 제어를 통해 전력 손실을 줄이려는 연구가 활발히 진행되고 있다 [1], [2].

본 논문에서는 이러한 배경을 바탕으로 3상 4선식 저압 계통을 대상으로 ICT 기반 3상 3선식 무효전력 조정장치를 개발하고, 해당 장치가 에너지 절감 관점에서 가지는 구조적·성능적 특성을 분석한다.

### II. ICT 기반 무효전력 조정장치 구조

개발된 무효전력 조정장치는 그림 1과 같이 3상 4선식 저압(380V AC) 전력계통에 연계되는 전력변환부와 계측·제어·통신 기능을 통합한 구조로 설계되었다. 전압 및 전류 센서를 통해 계통 상태 데이터를 실시간으로 수집하며, 수집된 데이터는 제어 알고리즘을 통해 무효전력 제어 지령 생성에 활용된다.

무효전력 제어는 유도성(30kvar) 및 용량성(15kvar) 운전 조건을 모두 고려하여 수행되며, 역률 기준 또는 무효전력 지령 기반의 연속적인 무효전력 주입·흡수가 가능하도록 구현되었다. 이러한 구조는 불필요한 무효전력 흐름을 최소화하여 송·배전 손실 및 설비 과부하를 줄이는 데 기여하며, 상위 에너지 관리 시스템(EMS) 또는 ICT 플랫폼과 연계 가능한 에너지 절감형 제어 노드로 활용될 수 있다 [1], [2].

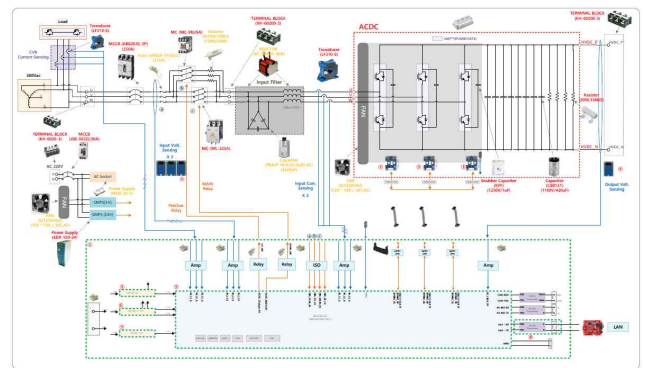


그림 1. 무효전력 조정장치 구조

### III. 성능 평가 구성 및 방법

개발된 무효전력 조정장치의 성능 평가는 공인 시험기관을 통해 수행되었으며, 평가 항목은 에너지 절감 효과와 직접적으로 연관되는 지표를 중심으로 구성되었으며, 평가 항목과 기준은 표 1과 같다.

표 1. 성능 평가 항목과 기준

평가 항목	기준
역률 개선율	10[%p] 이상
무효전력 제어 주기	30[s] 이내
전압 왜형률	5[%] 이하

역률 개선율은 유도성 및 용량성 부하 인가 전후의 계통 역률 변화를 기준으로 산출하였다. 무효전력 제어 주기는 제어 지령이 인가된 시점부터 무효전력이 목표 범위에 도달할 때까지의 시간을 측정하여 평가하였다. 전력 품질 평가는 전압 파형을 FFT 기반으로 분석하여 전압 왜형률(THD)을 산정하였다. 모든 시험은 동일 조건에서 3회 반복으로 수행되었으며, 시험 환경 구성은 그림 2와 같다.



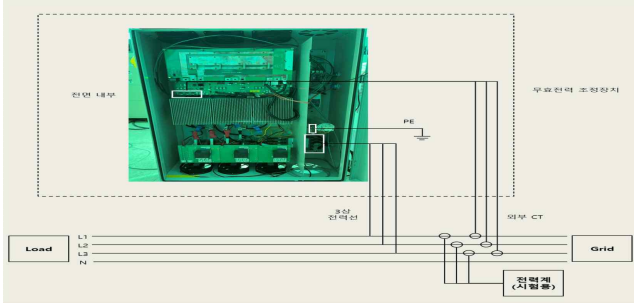


그림 2. 시험 환경 구성

#### IV. 성능 평가 결과 및 분석

성능 평가 결과, 제안된 무효전력 조정장치는 모든 평가 항목에서 요구 조건을 만족하였다. 그림 3, 4, 5는 각 평가 항목에 대한 결과 그래프를 나타내며, 공인 시험기관에서 획득된 시험 데이터를 기반으로 분석·정리한 것이다.

유도성 부하 조건에서는 16.03[%p], 용량성 부하 조건에서는 27.82[%p]의 평균 역률 개선 효과가 확인되었으며, 이는 무효전력 저감을 통해 전력 손실 감소 및 설비 효율 향상에 기여할 수 있는 수준이다.

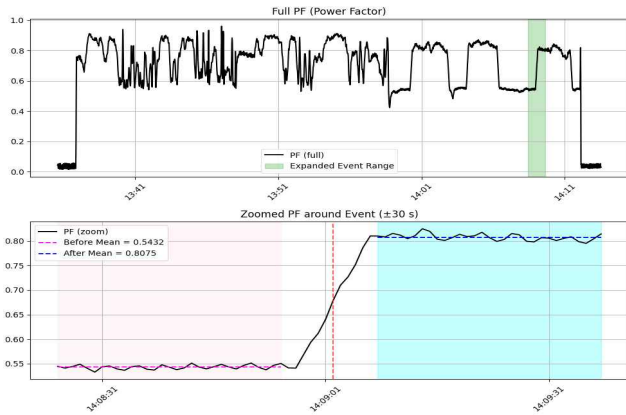


그림 3. 역률 조정범위 시험 결과(용량성 3회차)

무효전력 제어 주기는 유도성 및 용량성 조건 모두에서 제어 시 평균 12.66[s] 이내에 목표 상태에 도달하여, 부하 변동 시 불필요한 에너지 낭비를 최소화할 수 있는 응답 특성을 확보하였다.

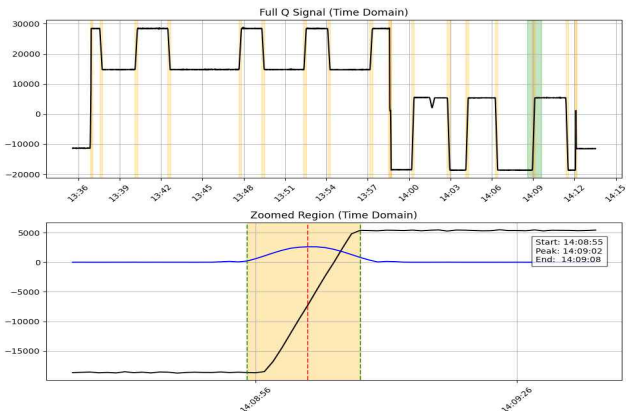


그림 4. 제어주기 시험 결과(용량성 3회차)

전력 품질 측면에서는 전압 왜형률(THD)이 유도성 부하 조건에서는 평균 3.37[%], 용량성 부하 조건에서는 평균 3.80[%]로 측정되어 관련 기준 (5% 이하)을 만족하였다. 이러한 결과는 인버터 기반 무효전력 제어 및 STATCOM 계열 기술의 전력 손실 저감 특성에도 부합한다 [3].

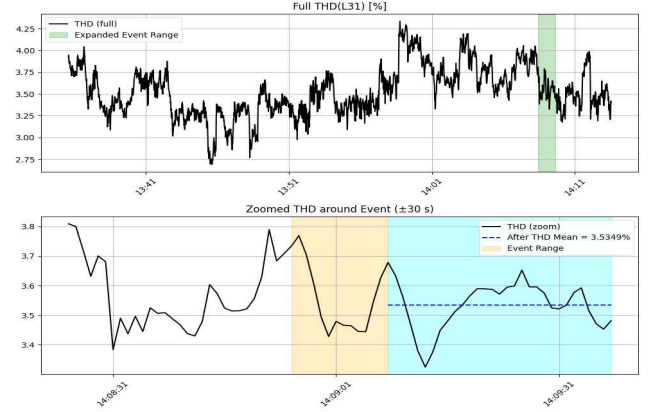


그림 5. 전압 왜형률 시험 결과(L31 용량성 3회차)

역률 조정범위와 무효전력 제어주기는 제어 시작 전·후 30[s] 구간 데이터와 무효전력 변화를 피크 너비 기준을 적용하여 산정하였고, 전압 왜형률은 제어 이후 30[s] 동안의 선간 전압 측정값을 기준으로 평가하였다.

#### V. 결론

본 논문에서는 ICT 기반 에너지 절감을 목표로 3상 3선식 무효전력 조정장치를 개발하고, 해당 장치의 구조와 성능 특성을 분석하였다. 성능 평가 결과, 제안된 장치는 유도성 및 용량성 조건 모두에서 10[%p] 이상 역률 개선 효과를 보였으며, 무효전력 제어는 12.66[s] 이내의 제어 주기로 수행되어 불필요한 전력 흐름을 신속히 억제할 수 있음을 확인하였다. 또한 전압 왜형률은 모든 조건에서 5[%] 이내로 유지되어 전력 품질 저하에 따른 추가적인 에너지 손실 가능성을 줄였다. 본 연구는 산업 설비 및 상업용 건물의 에너지 관리 시스템에 적용 가능한 ICT 기반 에너지 절감형 무효전력 제어 기술의 설계 방향을 제시한다.

#### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 202220290010B)

#### 참 고 문 헌

- [1] I. Murzakhanov et al., "Optimal design of Volt/VAR control rules for inverter-interfaced distributed energy resources," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 15, no. 1, pp. 312 - 323, Jan. 2024.
- [2] S. Gupta et al., "Optimal design of Volt/VAR control rules of inverters using deep learning," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 15, no. 5, pp. 4731 - 4743, 2024.
- [3] H. Basnet and T. Roinila, "Combining proportional-integral, deadbeat, and repetitive current controllers in energy-storage-equipped STATCOM application," IEEE Access, vol. 12, pp. 99499 - 99507, 2024.