(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0105296
(43) 공개일자 2023년07월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H02J 3/26 (2006.01) *H02J 3/16* (2006.01)
H02J 3/38 (2022.01)
(52) CPC특허분류
H02J 3/26 (2013.01)
H02J 3/16 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2022-0053241
(22) 출원일자 2022년04월29일
심사청구일자 2022년04월29일
(30) 우선권주장
1020220000532 2022년01월03일 대한민국(KR)

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
최승연
서울특별시 영등포구 신길로28길 9, 103동 604호
윤영걸
서울특별시 광진구 뚝섬로67가길 3-1, 101호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김등용

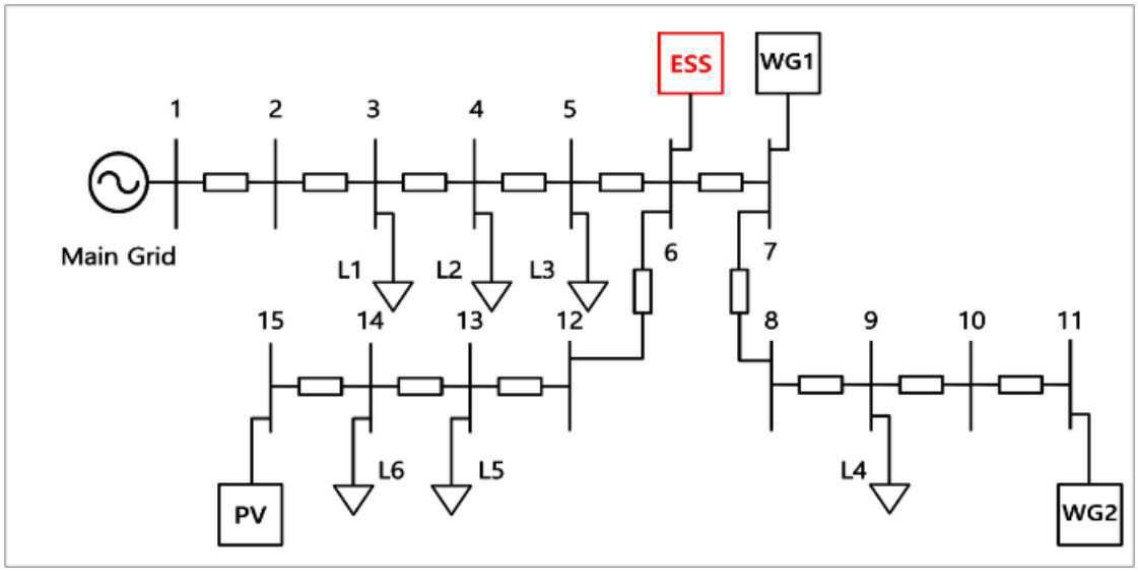
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 **배전 계통 내 인버터 기반 분산형 전원의 유효 전력 및 무효 전력 출력 제어를 통한 전압 불평형 해소 최적화 방법**

(57) 요 약

배전 계통 내 인버터 기반 분산형 전원의 유효 전력 및 무효 전력 출력 제어를 통한 전압 불평형 해소 최적화 방법이 개시된다. 상기 전압 불평형 해소 최적화 방법은 적어도 프로세서 및 메모리를 포함하는 컴퓨팅 장치에 의해 수행되고, 예측된 시계열 데이터들로써, 미리 정해진 시간 구간 동안의 부하 데이터, 태양광 발전 데이터, 풍력 발전 데이터, 및 에너지 저장 장치 데이터를 획득하는 단계, 상기 부하 데이터, 상기 태양광 발전 데이터, 상기 풍력 발전 데이터, 상기 에너지 저장 장치 데이터, 및 상기 배전 계통이 계통 파라미터를 이용하여 시뮬레이션함으로써, 상기 배전 계통의 계통 데이터를 획득하는 단계, 전압 불평형 해소를 위한 목적 함수를 설정하는 단계, 및 적어도 하나의 제약 조건을 이용하여 최적화 문제를 풀이함으로써 전압 불평형 해소를 위한 무효 전력 및 유효 전력을 산출하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H02J 3/381 (2013.01)
H02J 2300/22 (2020.01)
Y04S 10/12 (2020.08)

(72) 발명자
임준현
서울특별시 성북구 화랑로24길 64, 아트빌 103호

장길수
서울특별시 중랑구 신내로21길 16, 513동 503호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711135188
과제번호	2020R1A4A1019405
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	집단연구지원(R&D)
연구과제명	에너지 전환 환경에서의 통합 유연전력시스템 기술 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	고려대학교 산학협력단
연구기간	2021.06.01 ~ 2022.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415174424
과제번호	20191210301890
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	스마트그리드핵심기술개발[일몰]
연구과제명	소비자 전력품질 보장을 위한 배전망 전압안정화 핵심기술
기 여 율	1/2
과제수행기관명	고려대학교 산학협력단
연구기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

적어도 프로세서 및 메모리를 포함하는 컴퓨팅 장치에 의해 수행되는 전압 불평형 해소 최적화 방법에 있어서,

예측된 시계열 데이터들로써, 미리 정해진 시간 구간 동안의 부하 데이터, 태양광 발전 데이터, 풍력 발전 데이터, 및 에너지 저장 장치 데이터를 획득하는 단계;

상기 부하 데이터, 상기 태양광 발전 데이터, 상기 풍력 발전 데이터, 상기 에너지 저장 장치 데이터, 및 상기 배전 계통이 계통 파라미터를 이용하여 시뮬레이션함으로써, 상기 배전 계통의 계통 데이터를 획득하는 단계;

전압 불평형 해소를 위한 목적 함수를 설정하는 단계; 및

적어도 하나의 제약 조건을 이용하여 최적화 문제를 풀이함으로써 전압 불평형 해소를 위한 무효 전력 및 유효 전력을 산출하는 단계를 포함하는 전압 불평형 해소 최적화 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 부하 데이터는 상기 미리 정해진 시간 구간 동안의, 배전 계통에 포함된 부하들 각각에 대한 부하량에 대한 예측 데이터를 의미하고,

상기 태양광 발전 데이터는 상기 미리 정해진 시간 구간 동안의, 상기 배전 계통에 포함된 태양광 발전 설비의 발전량에 대한 예측 데이터를 의미하고,

상기 풍력 발전 데이터는 상기 미리 정해진 시간 구간 동안의, 상기 배전 계통에 포함된 풍력 발전 설비의 발전량에 대한 예측 데이터를 의미하고,

상기 에너지 저장 장치 데이터는 상미 미리 정해진 시간 구간 동안의, 상기 배전 계통에 포함된 에너지 저장 장치(Energy Storagy System, ESS)의 충전 및 방전 스케줄링 정보를 의미하는,

전압 불평형 해소 최적화 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 계통 데이터는 상기 배전 계통 내에 포함된 각 모선의 상별 전압 데이터를 의미하는,

전압 불평형 해소 최적화 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 유효 전력과 상기 무효 전력은 에너지 저장 장치의 유효 전력과 무효 전력인,

전압 불평형 해소 최적화 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 목적함수는 수학식 1로 정의되고,

상기 수학식 1은 $\min_{x}\{F^{-}(x)+F^{0}(x)\}$ 이고,

상기 $\bar{F}(x)$는 유효 전력과 무효 전력에 따른 역상분 전류이고,

상기 $F^{0}(x)$는 유효 전력과 무효 전력에 따른 영상분 전류이고,

상기 x는 수학식 2에 의해 정의되고,

상기 수학식 2는 $P_{PCC,a}, P_{PCC,b}, P_{PCC,c}, Q_{PCC,a}, Q_{PCC,b}, Q_{PCC,c} \in x$ 이고,

상기 $P_{PCC,a}$, $P_{PCC,b}$, 및 $P_{PCC,c}$는 PCC(Point of Common Coupling)에서 분산형 전원의 각 상별 유효 전력이고,

상기 $Q_{PCC,a}$, $Q_{PCC,b}$, $Q_{PCC,c}$는 PCC에서 상기 분산형 전원의 각 상별 무효 전력인,

전압 불평형 해소 최적화 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제약 조건은 수학식 3으로 정의되고, 최적화 결과가 배전 계통의 조류 해석을 만족하여야 함을 의미하는 제1 제약 조건을 포함하고,

상기 수학식 3은 $g(x,u) = 0$ 이고,

상기 u는 배전 계통에 포함된 모든 모선들의 삼상 전압을 나타내는 상태 변수(state varibales)이고, 상기 g는 키르히호프의 전류 법칙, 전력 균형, 외부 계통의 전압을 만족하도록 구성된 함수인,

전압 불평형 해소 최적화 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제약 조건은 수학식 4로 정의되는 제2 제약 조건을 포함하고,

상기 수학식 4는 $0.95 \leq V_t \leq 1.05,\ I_t < 1.5$ 이고,

상기 V_t는 배전 계통에 포함되는 모든 모선의 전압을 의미하고,

상기 I_t는 배전 계통에 포함되는 모든 선로에 흐르는 전류를 의미하는,

전압 불평형 해소 최적화 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제약 조건은 수학식 5로 정의되는 제3 제약 조건을 포함하고,

상기 수학식 5는 $P_{ESS}^{min}/3 \leq \overline{P_k} \leq 0,\ 0 \leq \overline{P_k} \leq P_{ESS}^{max}/3$ 이고,

상기 수학식 5는 제어 대상인 에너지 저장 장치의 충전 시 유효 전력 충전량($\overline{P_k}$)는 유효 전력 용량($P_{ESS}^{\min}$)의 1/3 이상이어야 하고, 방전 시 유효 전력 출력($\overline{P_k}$)은 유효 전력 용량($P_{ESS}^{\max}$)의 1/3 이하이어야 함을 의미하는,

전압 불평형 해소 최적화 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제약 조건은 수학식 6으로 정의되는 제4 제약 조건을 포함하고,

상기 수학식 6은 $|\overline{P_A}+\overline{P_B}+\overline{P_C}-\overline{P_{ESS}}| \le \varepsilon,\ \sqrt{(\overline{P_k})^2+(\overline{Q_k})^2} \le S_k$ 이고,

상기 수학식 6은 제어 대상인 에너지 저장 장치의 3상 유효 전력 출력은 시나리오와 일정 차이(ε)를 허용함과 각 상별 유효 전력 및 무효 전력 출력은 용량을 초과하지 않아야 함을 의미하는,

전압 불평형 해소 최적화 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 전압 불평형 해소 최적화 방법에 관한 것으로, 특히 배전 계통 내 인버터 기반 분산형 전원의 유효 전력 및 무효 전력 출력 제어를 통한 전압 불평형 해소 최적화 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 배전 계통 내에서 분산형 전원(Distributed Energy Resources, DER)의 연계가 증가하고 있다. 즉, 3상 전압 불평형(three-phase unbalanced voltage)을 야기하는 단상 부하(single-phase load)와 DER이 배전 계통 내 연계되고 있는 추세이다. DER의 불확실성으로 인하여, 전압 안정성(voltage stability)에 대한 연구는 매우 중요한 연구 영역이다.

[0003] 이에 본 발명에서는 배전 계통 내에서의 전압 불평형 해소를 위한 보상 방법을 제안한다. 최적화 문제의 제어 변수(control variables)는, PV나 ESS와 같은 인버터 기반 DER(inverter-based DER)의 유효 전력(active power)과 무효 전력(reactive power)이다.

[0004] 종래의 인버터 출력 제어 기법들은 전압 불평형을 해소하기 위해 무효 전력만을 고려하였다. 그러나, 배전 계통의 경우에는 높은 X/R 비율 특성을 보이므로, 유효 전력의 영향성도 고려하여야 한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제1212830호 (2012.12.14. 공고)

(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허 제2316744호 (2021.10.22. 공고)

(특허문헌 0003) 대한민국 공개특허 제2018-0044718호 (2018.05.03. 공개)

(특허문헌 0004) 대한민국 등록특허 제2281229호 (2021.07.22. 공고)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명이 이루고자 하는 기술적인 과제는 배전 계통 내 인버터 기반 분산형 전원의 유효 전력 및 무효 전력 출력 제어를 통한 전압 불평형 해소 최적화 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명의 일 실시예에 따른, 배전 계통 내 인버터 기반 분산형 전원의 유효 전력 및 무효 전력 출력 제어를 통한 전압 불평형 해소 최적화 방법은 적어도 프로세서 및 메모리를 포함하는 컴퓨팅 장치에 의해 수행되고, 예측된 시계열 데이터들로써, 미리 정해진 시간 구간 동안의 부하 데이터, 태양광 발전 데이터, 풍력 발전 데이터, 및 에너지 저장 장치 데이터를 획득하는 단계, 상기 부하 데이터, 상기 태양광 발전 데이터, 상기 풍력 발전 데이터, 상기 에너지 저장 장치 데이터, 및 상기 배전 계통이 계통 파라미터를 이용하여 시뮬레이션함으로써, 상기 배전 계통의 계통 데이터를 획득하는 단계, 전압 불평형 해소를 위한 목적 함수를 설정하는 단계, 및 적어도 하나의 제약 조건을 이용하여 최적화 문제를 풀이함으로써 전압 불평형 해소를 위한 무효 전력 및 유효 전력을 산출하는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0008] 본 발명의 실시예에 따른 전압 불평형 해소 최적화 방법에 의할 경우, 배전 계통에 연계되는 단상 부하 및 분산형 전원으로 인해 발생하는 전압 불평형 현상을 해소하여 안정적인 계통 운영에 기여할 수 있는 효과가 있다.

[0009] 또한, 태양광 발전, 풍력 발전, 및 에너지 저장 시스템과 같은 분산형 전원이 증대되는 미래 배전 계통에서 계통의 안정성을 높일 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0010] 본 발명의 상세한 설명에서 인용되는 도면을 보다 충분히 이해하기 위하여 각 도면의 상세한 설명이 제공된다.

도 1은 본 발명이 적용되는 배전 계통의 일 예를 도시한다.

도 2는 본 발명에 의한 최적화 결과인, ESS의 각 상의 유효 전력을 나타내는 그래프를 도시한다.

도 3은 본 발명에 의한 최적화 기법을 적용하기 전과 적용 후의 VUF의 비교 결과를 나타내는 그래프를 도시한다.

도 4는 본 발명에 의한 최적화 기법을 적용하기 전과 적용한 후의 차이를 나타내는 VUF 이득(VUF benefit)의 그래프를 도시한다.

도 5는 본 발명에 의한 최적화 결과인, PV의 각 상의 유효 전력을 나타내는 그래프를 도시한다.

도 6은 본 발명에 의한 최적화 기법을 적용하기 전과 적용 후의 VUF의 비교 결과를 나타내는 그래프를 도시한다.

도 7은 본 발명에 의한 최적화 기법을 적용하기 전과 적용한 후의 차이를 나타내는 VUF 이득(VUF benefit)의 그래프를 도시한다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 전압 불평형 해소 최적화 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0011] 본 명세서에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시예들에 대해서 특정한 구조적 또는 기능적 설명들은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로서, 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 형태들로 실시될 수 있으며 본 명세서에 설명된 실시예들에 한정되지 않는다.

[0012] 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 변경들을 가할 수 있고 여러 가지 형태들을 가질 수 있으므로 실시예들을 도면에 예시하고 본 명세서에서 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 특정한 개시 형태들에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물, 또는 대체물을 포함한다.

[0013] 제1 또는 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성 요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만, 예컨대 본 발명의 개념에 따른 권리 범위로부터 벗어나지 않은 채, 제1 구성 요소는 제2 구성 요소로 명명될 수 있고 유사하게 제2 구성 요소는 제1 구성 요소로도 명명될 수 있다.

[0014] 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성 요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성 요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는 중간에 다른 구성 요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성 요소들 간의 관계를 설명하는 다른 표현들, 즉 "~사이에"와 "바로 ~사이에" 또는 "~에 이웃하는"과 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.

[0015] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로서, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 본 명세서에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야

한다.

[0016] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가진다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0017] 이하, 본 명세서에 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 실시예들을 상세히 설명한다. 그러나, 특허출원의 범위가 이러한 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0018] 이하에서는, 최적화 문제를 구성하는 목적 함수(objective function)와 제약 조건(constraints)을 설명한다.

[0019] **목적 함수(Objective function)**

[0020] 불평형 전압을 최소화하기 위해서는 MATLAB의 fmincon function과 같은 최적화 기법(또는 알고리즘)이 이용될 수 있다. 불평형 전압 요소(unbalanced voltage components)를 최소하기 위해, 불평형 전압으로 인해 유도되는 영상분 출력 전류(zero-sequence current)와 역상분 출력 전류(negative sequence current)를 유도할 수 있다. ESS(Energy Storage System)나 PV와 같은 인버터 기반 분산형 전원의 유효 전력(Active Power)과 무효 전력(Reactive Power)을 제어 변수로 갖는 목적 함수는 수학식 1과 같고, 수학식 1의 x는 수학식 2와 같다. 즉, 수학식 1은 제어 가능한 분산형 전원, 예컨대 ESS 또는 PV의 유효 전력과 무효 전력을 제어 변수로 갖는 목적 함수이다.

[0021] [수학식 1]

[0022] $$\min_{x}\{F^{-}(x)+F^{0}(x)\}$$

[0023] [수학식 2]

[0024] $$P_{PCC,a}, P_{PCC,b}, P_{PCC,c}, Q_{PCC,a}, Q_{PCC,b}, Q_{PCC,c} \in x$$

[0025] 수학식 1에서 $F^{-}(x)$는 유효 전력과 무효 전력에 따른 역상분 전류이고 $F^{0}(x)$는 유효 전력과 무효 전력에 따른 영상분 전류이다. 또한, x는 목적 함수의 제어 변수로써 PCC(Point of Common Coupling)에서 DER(ESS 또는 PV)의 유효 전력과 무효 전력을 나타낸다.

[0026] 이하에서는, 최적화 문제를 풀이하기 위한 제약 조건을 설명한다.

[0027] 최적화 문제에서, 시뮬레이션 환경은 전력 흐름(power flow), 전압 크기(voltage magnitude), 선로를 통한 전류 흐름(current flow), ESS의 충전 용량(charge capacity)과 방전 용량(discharge capacity), 및 PV의 출력 용량(PV output capacity)을 만족하여야 한다. 제약 조건들은 수학식 3 내지 수학식 6과 같다.

[0028] [수학식 3]

[0029] $$g(x,u)=0$$

[0030] [수학식 4]

[0031] $$0.95 \le V_t \le 1.05,\ I_t < 1.5$$

[0032] [수학식 5]

[0033] $$P_{ESS}^{min}/3 \le \overline{P_k} \le 0,\ 0 \le \overline{P_k} \le P_{ESS}^{max}/3$$

[0034] [수학식 6]

[0035] $$|\overline{P_A}+\overline{P_B}+\overline{P_C}-\overline{P_{ESS}}| \le \varepsilon,\ \sqrt{(\overline{P_k})^2+(\overline{Q_k})^2} \le S_k$$

[0036] 수학식 3에서, x는 수학식 2에 정의되어 있고, u는 (배전) 계통에 포함된 모든 모선들(buses)의 삼상 전압을 나타내는 상태 변수(state variables)이다. 수학식 3은, 최적화 결과는 (배전) 계통의 조류 해석을 만족하여야 함

을 의미할 수 있다. 함수 g는 키르히호프의 전류 법칙, 전력 균형, 외부 계통의 전압을 만족하도록 구성하였다.

[0037] 보다 구체적으로, 수학식 3(계통 제약 조건)은 전압 불평형을 위한 최적화 함수로 fmincon을 활용하며 선형 등식, 부등식 및 비선형 등식, 부등식 제약 조건을 포함할 수 있다. 제시하는 최적화 문제에서 등식 제약 조건을 모두 포함하는 식이 수학식 3에 포함되어 있고, 나머지 부등식 제약 조건은 별도의 제약 조건(예컨대, 수학식 4 등)으로 서술되었다. 또한, 수학식 3에 대한 보다 상세한 설명은 Choi 등의 논문(S. Choi and A. P. S. Meliopoulos, "Effective Real-Time Operation and Protection Scheme of Microgrids Using Distributed Dynamic State Estimation," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 1, pp. 504-514, Feb. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2580638.)이 참조될 수 있다.

[0038] 상전압 제약 조건과 전류 제약 조건은 수학식 4로 나타낼 수 있다. 즉, 모든 모선의 전압은 미리 정해진 범위의(예컨대, 0.95pu 보다 크거나 같고 1.05pu 보다 작거나 같은) 값을 가진다. 마찬가지로, 선로에 흐르는 전류는 미리 정해진 범위의(예컨대, 1.5pu 이하) 값을 가진다.

[0039] ESS의 가용 동작 범위는 수학식 5와 수학식 6으로 나타낼 수 있다. ESS의 충전 시 유효 전력 충전량은 유효 전력 용량의 1/3 이상이어야 하며, ESS의 방전 시 유효 전력 출력은 유효 전력 용량의 1/3 이하여야 한다. 또한, ESS의 3상 유효 전력 출력은 시나리오와 일정 차이를 허용한다. 예를 들어, ε를 P_{ESS}의 10%로 가정한다면, 프로파일에 따른 시나리오 대비 10% 허용 오차를 두어 최적화를 위한 P_A, P_B, 및 P_C 값의 범위를 설정한다. 또한, ESS의 각 상별 유효 전력 및 무효 전력 출력은 용량을 초과하지 않아야 한다.

[0040] **전압 불평형 척도(Voltage Unbalanced Factor, VUF)**

[0041] 전압 불평형의 정도를 측정하기 위한 지표로써 VUF(Voltage Unbalanced Factor)가 이용될 수 있다. VUF는 정상분 대비 역상분의 비율을 나타내며, 수학식 7과 같이 주어질 수 있다.

[0042] [수학식 7]

[0043] $$VUF = \frac{negative-sequence\ voltage}{positive-sequence\ voltage}$$

[0044] 실시예에 따라, VUF는 수학식 8 등과 같이 수학식 7과는 상이하게 정의될 수도 있다.

[0045] [수학식 8]

[0046] $$VUF = \frac{1}{2} \times \frac{\text{zero sequence voltage} + \text{negative sequence voltage}}{\text{positive sequence voltage}}$$

[0047] 도 1은 본 발명이 적용되는 배전 계통의 일 예를 도시한다.

[0048] 도 1을 참조하면, 배전 계통은 계통 내 설비가 연계되는 복수의 모선들(예컨대, 15개의 모선들), 상위 계통인 외부 계통(Main Grid), 소정의 선로 임피던스를 갖고 모선과 모선 사이를 연결하는 복수의 선로들을 포함한다. 또한, 적어도 일부의 모선에는 부하, 분산형 전원인 태양광 발전 설비(PV), 풍력 발전 설비(WG1, WG2), 및 에너지 저장 장치(ESS) 중 어느 하나가 연계될 수 있다.

[0049] 다만, 본 발명의 권리범위가 모선의 개수, 모선을 연결하는 선로의 개수, 부하의 개수, 부하가 연계되는 모선, 태양광 발전 설비의 개수, 태양광 발전 설비가 연계되는 모선, 풍력 발전 설비의 개수, 풍력 발전 설비가 연계되는 모선, 에너지 저장 장치의 개수, 에너지 저장 장치가 연계되는 모선에 제한되는 것은 아니며, 실시예에 따라 다양한 배전 계통이 구성될 수 있다.

[0050] 본 발명에 의한 최적화 기법을 적용하여 제어 가능한 구성은 붉은색으로 표시되어 있다. 즉, ESS는 제안하는 실시간 최적화 기법을 이용하여 제어될 수 있다. 최적화 결과인, 각 상의 유효 전력은 도 2에 도시되어 있다. 또한, 제어 가능한 ESS에 인접한(ESS가 연계된) 모선(6)을 선택하여 최적화 결과를 분석할 수 있다. 최적화 기법을 적용하기 전과 적용 후의 VUF의 비교 결과는 도 3에 도시되어 있다. VUF 이득(VUF benefit)은 최적화 기법을 적용하기 전과 적용한 후의 차이를 나타내고, 이는 도 4에 도시되어 있다.

[0051] ESS는 PV의 출력 전력이 야간(nighttime)보다 더 큰 주간(daytime) 동안에 최적화될 수 있다. 평균 VUF 이득은 0.091%이고, 이는 모선 6에서의 VUF 이득의 평균치에 해당한다.

[0052] PV(태양광 발전 설비) 또한 상술한 바와 같은 방식으로 제어 가능하다. 최적화 결과는 도 5, 도 6, 및 도 7에

도시되어 있다. 즉, 도 5에는 최적화 결과인, PV의 각 상의 유효 전력이 도시되어 있고, 도 6에는 최적화 기법을 적용하기 전과 적용 후의 VUF의 비교 결과가 도시되어 있고, 도 7에는 최적화 기법을 적용하기 전과 적용한 후의 차이를 나타내는 VUF 이득(VUF benefit)이 도시되어 있다.

[0053] PV는 다른 분산형 전원의 출력 전력이 야간보다 더 큰 주간 동안에 최적화될 수 있다. 평균 VUF 이득은 0.1696%이고, 이는 모선 6에서의 VUF 이득의 평균치에 해당한다.

[0054] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 전압 불평형 해소 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

[0055] 전압 불평형 해소 최적화 방법 등으로 명명될 수도 있는 전압 불평형 해소 방법은 적어도 프로세서(processor) 및/또는 메모리(memory)를 포함하는 컴퓨팅 장치에 의해 수행될 수 있다. 다시 말하면, 전압 불평형 해소 방법에 포함되는 각 단계들 중 적어도 일부는 컴퓨팅 장치에 포함되는 프로세서에 의해 수행되는 것으로 이해될 수 있고, 프로세서의 동작을 실행하기 위한 프로그램 명령어들은 프로세서에 연결되는 메모리에 저장되는 것으로 이해될 수 있다. 컴퓨팅 장치는 전압 불평형 해소 장치 전압 불평형 해소 최적화 장치로 명명될 수도 있으며, PC(Personal Computer), 태블릿 PC, 랩탑 컴퓨터, 서버 등으로 구현될 수 있다.

[0056] 우선, 최적화 문제의 풀이에 이용되는 데이터가 수집될 수 있다(S110). 데이터는 미리 정해진 시간 구간(예컨대, 24시간) 동안의 시계열 데이터로써, 배전 계통에 포함된 부하에 대한 데이터(부하 데이터), 태양광 발전 설비에 대한 데이터(태양광 발전 데이터), 풍력 발전 설비에 대한 데이터(풍력 발전 데이터), 및 에너지 저장 장치에 대한 데이터(에너지 저장 장치 데이터) 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.

[0057] 부하 데이터는 최적화 동작을 수행하기 위한 날(또는 일정 시간 구간)의 부하량에 대한 예측 데이터로써, 알려진 예측 기법 및/또는 통계적 기법을 적용하여 획득된 것일 수 있다. 다시 말하면, 부하 데이터는 미리 정해진 기간 동안 각 부하의 부하량에 대한 예측 데이터를 의미할 수 있다.

[0058] 태양광 발전 데이터는 최적화 동작을 수행하기 위한 날(또는 일정 시간 구간)의 태양광 발전 설비의 발전량에 대한 예측 데이터로써, 알려진 예측 기법 및/또는 통계적 기법을 적용하여 획득된 것일 수 있다. 다시 말하면, 태양광 발전 데이터는 미리 정해진 기간 동안 각 태양광 발전 설비의 발전량에 대한 예측 데이터를 의미할 수 있다.

[0059] 풍력 발전 데이터는 최적화 동작을 수행하기 위한 날(또는 일정 시간 구간)의 풍력 발전 설비의 발전량에 대한 예측 데이터로써, 알려진 예측 기법 및/또는 통계적 기법을 적용하여 획득된 것일 수 있다. 다시 말하면, 풍력 발전 데이터는 미리 정해진 기간 동안 각 풍력 발전 설비의 발전량에 대한 예측 데이터를 의미할 수 있다.

[0060] 에너지 저장 장치 데이터는 최적화 동작을 수행하기 위한 날(또는 일정 시간 구간)의 에너지 저장 장치의 충전 및 방전량에 대한 예측 데이터로써, 알려진 예측 기법 및/또는 통계적 기법을 적용하여 획득된 것일 수 있다. 실시예에 따라, 에너지 저장 장치 데이너는 미리 획득된 부하 데이터, 태양광 발전 데이터, 및 풍력 데이터에 따라 스케줄링된 충전 및 방전량 정보를 의미할 수도 있다. 다시 말하면, 에너지 저장 장치 데이터는 미리 정해진 기간 동안 에너지 저장 장치의 충전 및 방전량(충방전 스케줄)에 대한 예측 데이터를 의미할 수 있다.

[0061] 다음으로, 계통 데이터가 생성된다(S120). 계통 데이터는 배전 계통에 포함되는 각 모선의 상별 전압 데이터와 각 분산형 전원의 상별 유효 전력 및 무효 전력을 포함할 수 있다. 계통 데이터 역시 시계열 데이터로써 미리 정해진 시간 구간 동안의 데이터를 의미할 수 있다. 계통 데이터를 생성하기 위해, 프로세서는 계통 파라미터와 데이터(부하 데이터, 태양광 발전 데이터, 풍력 발전 데이터, 및 에너지 저장 장치 데이터 중 적어도 하나)를 입력으로 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 계통 파라미터는 배전 계통의 구조에 결정적인 파라미터이다. 즉, 외부 계통, 선로(선로 임피던스)의 파라미터는 운영자의 배전 계통에 따라 미리 주어질 수 있다.

[0062] 보다 구체적으로, 계통 파라미터는 본 발명이 적용되는 배전 계통에서 정의해야 하는 모든 파라미터를 포함할 수 있다. 본 발명에서 제안하는 예시적인 배전 계통(모의 계통)에서는 다음과 같은 계통 파라미터가 정의된다. 외부 계통은 3상 전압원 모델을 사용하여 전압, 주파수, 전원의 임피던스(R, L) 파라미터를 포함한다. 선로 모델에서는 선로의 길이, 길이당 mutual capacitance, 길이당 self capacitance, 길이당 self resistance, 길이당 self reactance, 길이당 mutual resistance, 및 길이당 mutual reactance를 포함한다. 부하, 태양광 발전소, 풍력 발전송 입력되는 프로파일은 프로파일 데이터라고 별도로 지칭하고 있으며, 이외에 입력해야 하는 파라미터로써 연계 전압을 계통 파라미터라 할 수 있다. 또한, 에너지 저장 장치(ESS)의 초기 및 마지막 충전 상태, 용량, 역률, SOC(state of charge)의 최대, 최솟값 역시 계통 파라미터에 포함될 수 있다.

[0063] 이후, 컴퓨팅 장치의 프로세서는 최적화를 위한 목적 함수를 구성하고(S130), 적어도 하나의 제약 조건을 적용

하여 최적화 문제를 풀이(S140)할 수 있다. 최적화의 결과로써, 제어 대상인 분산형 전원(예컨대, 에너지 저장 장치 또는 태양광 발전 설비)의 유효 전력과 무효 전력 값을 도출할 수 있다.

[0064] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성 요소, 소프트웨어 구성 요소, 및/또는 하드웨어 구성 요소 및 소프트웨어 구성 요소의 집합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성 요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(Arithmetic Logic Unit), 디지털 신호 프로세서(Digital Signal Processor), 마이크로컴퓨터, FPA(Field Programmable array), PLU(Programmable Logic Unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(Operation System, OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(Processing Element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(Parallel Processor)와 같은, 다른 처리 구성(Processing Configuration)도 가능하다.

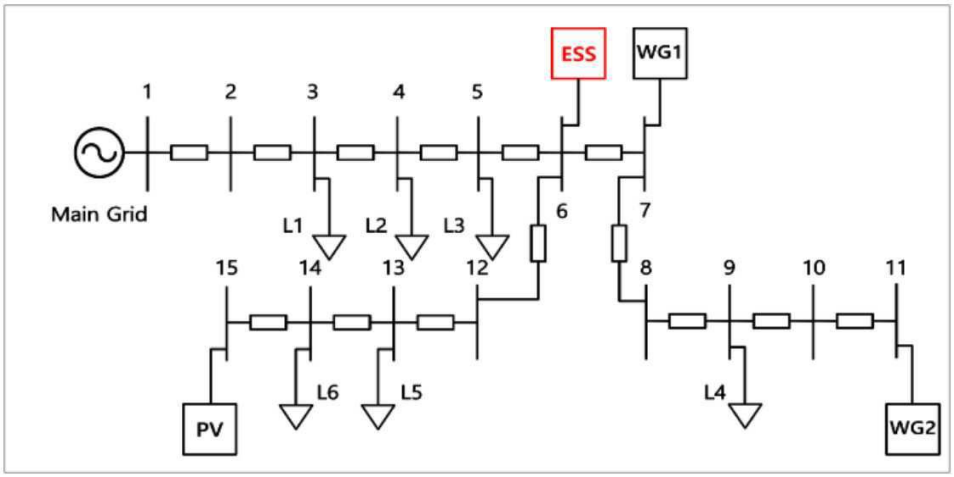
[0065] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(Computer Program), 코드(Code), 명령(Instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(Collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성 요소(Component), 물리적 장치, 가상 장치(Virtual Equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치, 또는 전송되는 신호 파(Signal Wave)에 영구적으로, 또는 일시적으로 구체화(Embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

[0066] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(Magnetic Media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(Optical Media), 플롭티컬 디스크(Floptical Disk)와 같은 자기-광 매체(Magneto-optical Media), 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상기된 하드웨어 장치는 실시예의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

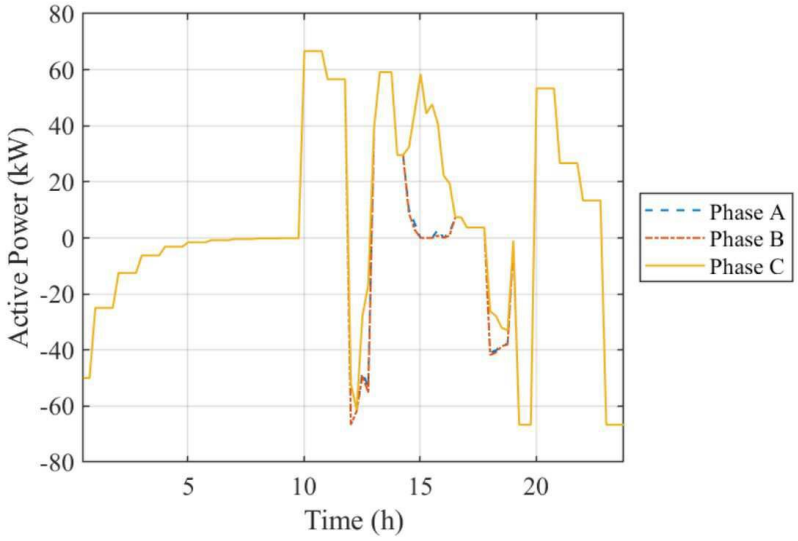
[0067] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성 요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성 요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 등록청구범위의 기술적 사상에 의해 정해져야 할 것이다.

도면

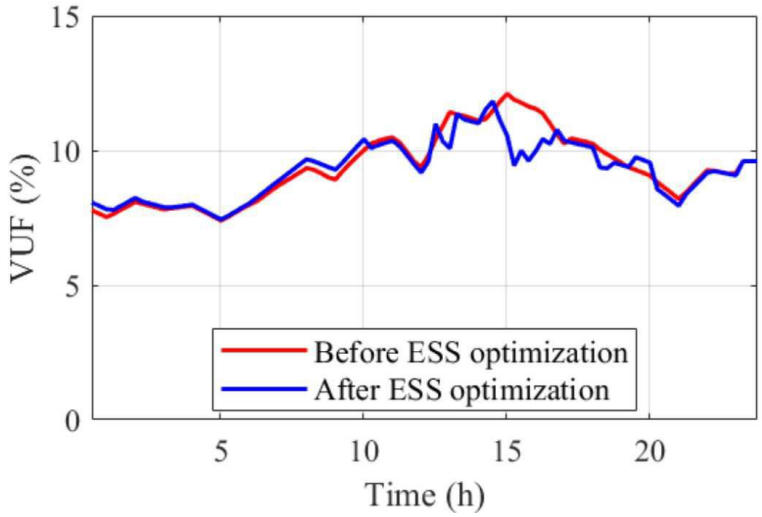
도면1


ESS
WG1
1
2
3
4
5
Main Grid
L1
L2
L3
6
7
15
14
13
12
8
9
10
11
L6
L5
L4
PV
WG2

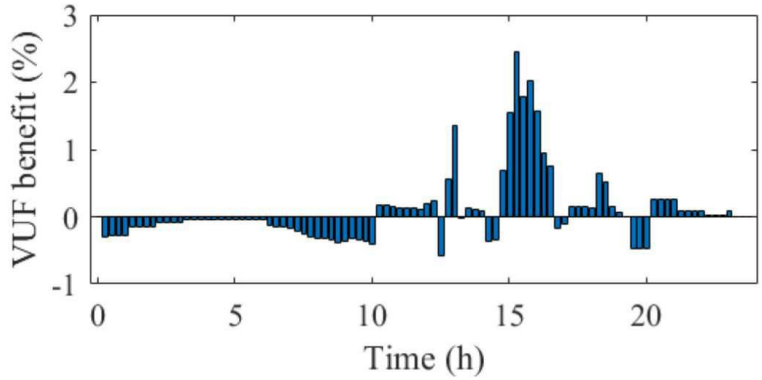
도면2


80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
Active Power (kW)
5
10
15
20
Time (h)
Phase A
Phase B
Phase C

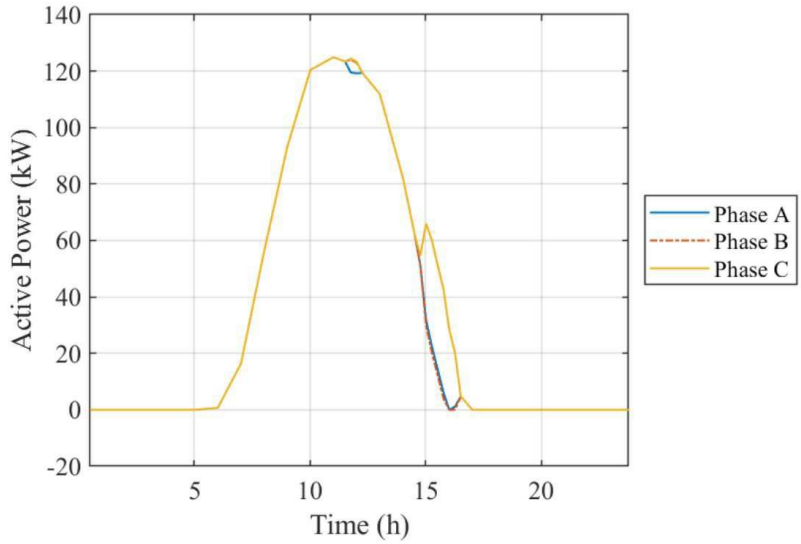
도면3


15
10
5
0
VUF (%)
Before ESS optimization
After ESS optimization
5
10
15
20
Time (h)

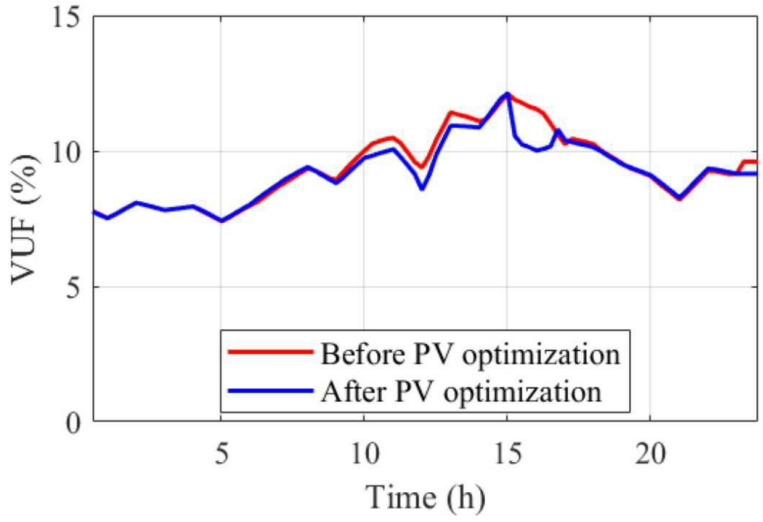
도면4


3
2
1
0
-1
VUF benefit (%)
0
5
10
15
20
Time (h)

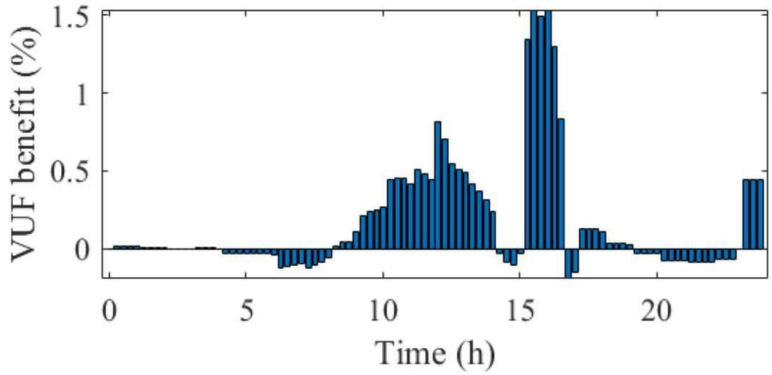
도면5


140
120
100
80
60
40
20
0
-20
Active Power (kW)
5
10
15
20
Time (h)
Phase A
Phase B
Phase C

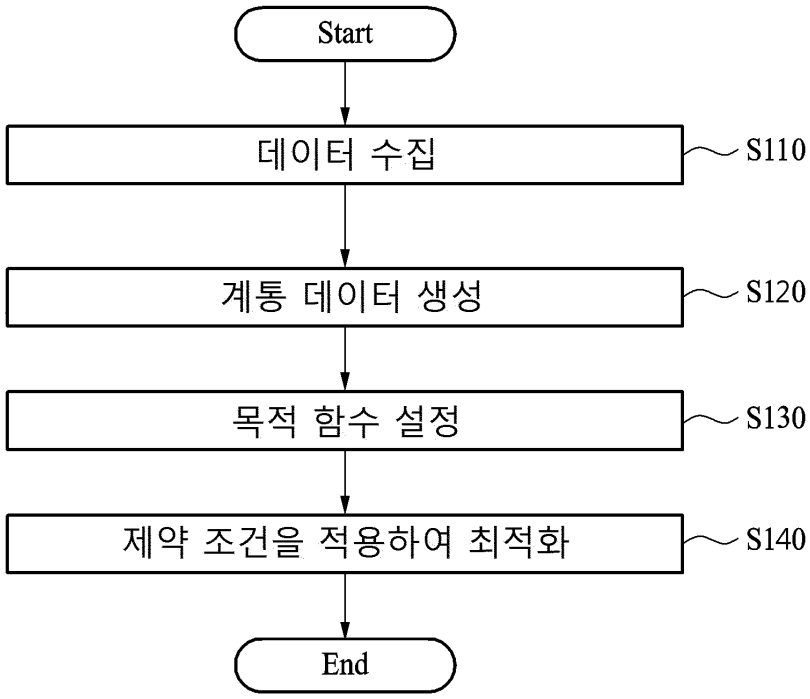
도면6


15
10
5
0
VUF (%)
5
10
15
20
Time (h)
Before PV optimization
After PV optimization

도면7


1.5
1
0.5
0
VUF benefit (%)
0
5
10
15
20
Time (h)

도면8


Start
데이터 수집
S110
계통 데이터 생성
S120
목적 함수 설정
S130
제약 조건을 적용하여 최적화
S140
End