



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년06월19일
(11) 등록번호 10-1748294
(24) 등록일자 2017년06월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H02J 3/18 (2006.01) H02J 3/38 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H02J 3/18 (2013.01)
H02J 3/386 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2016-0076853
(22) 출원일자 2016년06월20일
심사청구일자 2016년06월20일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020120083848 A*
KR1020150008753 A*
JP2011030382 A*
KR1020150112540 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
정길수
서울특별시 중랑구 신내로21길 16, 513동 503호(목동, 신내두산대림아파트)
정승민
서울특별시 광진구 구의강변로5길 7 101동 801호(구의동, 성동강변파크빌)
(74) 대리인
김홍석, 김동용

전체 청구항 수 : 총 5 항

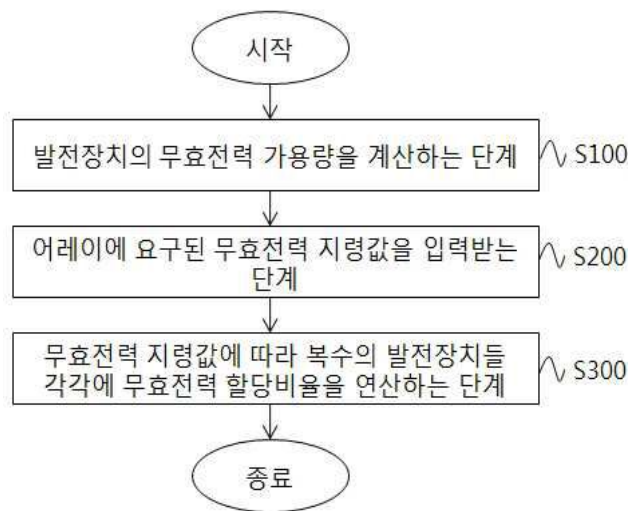
심사관 : 추형석

(54) 발명의 명칭 발전단지시스템에서의 무효전력제어방법

(57) 요약

본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법은 복수의 발전장치 각각이 케이블로 연결되어 어레이를 형성하는 발전시스템에서 구현되고, 전력제어장치에 의해서 수행되는 무효전력제어방법으로서, 상기 어레이에 요구된 무효전력 지령값을 입력받는 단계 및 상기 무효전력 지령값에 따라 상기 복수의 발전장치들 각각에 무효전력 할당비율을 연산하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류
Y02E 10/763 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

복수의 발전장치 각각이 케이블로 연결되어 어레이를 형성하는 발전시스템에서 구현되고, 전력제어장치에 의해서 수행되는 무효전력제어방법으로서,

상기 어레이에 요구된 무효전력 지령값을 입력받는 단계; 및

상기 무효전력 지령값에 따라 상기 복수개의 발전장치들 각각에 무효전력 할당비율을 연산하는 단계를 포함하고,

상기 무효전력 할당비율을 연산하는 단계는 상기 케이블의 저항성분을 이용하여 유효전력 손실 개선을 위해 상기 복수의 발전장치 각각에 할당되는 무효전력 비율을 연산하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 무효전력 제어방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 무효전력 지령값을 입력받는 단계 이전에 상기 발전장치의 무효전력 가용량을 계산하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 무효전력제어방법.

청구항 4

n개(n은 2 이상의 정수)의 풍력발전기가 케이블로 연결되어 어레이를 형성하고, 상기 n개의 풍력발전기와 어레이 간의 연결부위에 n개의 노드가 형성되는 발전시스템에서 구현되고, 전력제어장치에 의해서 수행되는 무효전력 제어방법으로서,

상기 어레이에 요구된 무효전력 지령값을 입력받는 단계; 및

상기 무효전력 지령값에 따라 상기 n개의 풍력발전기들 각각에 무효전력 할당비율을 연산하는 단계를 포함하고,

상기 무효전력 할당비율($\frac{Q_{G,n+1}}{Q_{G,n}}$)은 $\frac{\eta_{n+1}(1-\eta_n)}{\eta_n}$ 을 이용하여 연산하는 것을 특징으로 하는 무효전력 제어방법.

여기서, $Q_{G,n+1}$ 은 n+1번째 노드와 연결된 풍력발전기의 무효전력출력량, $Q_{G,n}$ 은 n번째 노드와 연결된 풍력발전기의 무효전력출력량,

$\eta_n = \frac{\sqrt{r_{n,n+1}}}{\sqrt{r_{Hn}} + \sqrt{r_{n,n+1}}}$, $r_{n,n+1}$ 는 n노드와 n+1노드 사이 저항, r_{Hn} 은 n노드와 연결된 풍력발전기의 높이(H)사이의 저항임.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 무효전력 지령값을 입력받는 단계 이전에 상기 n개의 풍력발전기 각각의 무효전력 가용량을 계산하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 무효전력제어방법.

청구항 6

제4항 또는 제5항의 무효전력제어방법으로 구현되는 풍력발전시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 발전단지시스템에서의 무효전력제어방법에 관한 발명으로서, 보다 상세하게는 복수의 발전장치가 연결되어 있는 발전단지시스템에서 무효전력제어방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 신재생에너지원의 변동성에 주목하여 다양한 제어기법과 보상방안이 연구되고 있으며, 특정 시스템에 한정하지 않고 기계·전기·예측시스템 등 다수의 분야를 통합하여 제어 개선 효과를 극대화하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구는 소규모 풍력시스템에 실증적으로 도입되고 있으며, 대규모 풍력발전단지 개발사업과 연계하여 제어시스템 구성 및 도입, 다양한 풍력발전기와 응용을 위한 범용성 확대 등 개발범위가 확대되고 있다.

[0004] 특히, 최근에는 풍력발전단지를 효과적으로 관리하기 위한 다양한 제어기법이 소개되고 있고, 효과적인 예측을 위해 후류효과와 같은 기계적 특성을 바탕으로 풍력발전단지 제어시스템 구성이 진행되고 있다. 이러한 풍력발전단지 제어시스템에서는 예측된 풍속과 측정된 연계지점(PCC)의 전압을 바탕으로 유효전력과 무효전력관리를 수행하며 다양한 최적화 과정을 도입함으로써 그 효과성을 입증하고 있다.

[0005] 최근 주목 받고 있는 풍력시스템은 출력 변동문제와 소음문제로 인해 해상에 대규모로 구성하는 방향으로 연구되고 있으며, 해상에서 발전이 가능하고 효율성에서 장점을 가지고 있는 단지화 구성이 고려되고 있다. 해상풍력단지를 구성하기 위해서는 계통에 전력을 공급하기 위한 송·변전 설비 인프라를 구축해야 하며, 대규모 시스템 구성 시 구축비용이 절감된다는 장점이 있다.

[0006] 기존 풍력발전시스템에서는 PCS(Power Control System)의 부재나 풍력발전시스템의 낮은 용량으로 인해 무효전력 공급을 요구하고 제어하기보다, 일정 전압제어 또는 역률제어를 수행하여 계통에의 영향을 최소화하도록 제어하는 경우가 일반적이었다.

[0007] 그러나 해상풍력단지와 같이 설비용량이 100 MW를 초과하는 발전 단위는 무효전력 가용량을 최대한 활용할 것으로 예상되며, 보다 정확한 제어관리시스템의 필요성이 요구되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허 제10-2014-0081057호(2014.07.01)

(특허문헌 0002) 대한민국 공개특허 제10-2014-0081058호(2014.07.01)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명의 목적은 발전단지 시스템에서 무효전력출력을 제어하는 방법을 제공하는 것이다.

[0011] 또한, 본 발명의 목적은 무효전력 제어를 통해서 발전설비의 출력손실을 최소화하기 위한 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0013] 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법은 복수의 발전장치 각각이 케이블로 연결되어 어레이를 형성하는 발전시스템에서 구현되고, 전력제어장치에 의해서 수행되는 무효전력제어방법으로서, 상기 어레이에 요구된 무효전력 지령값을 입력받는 단계 및 상기 무효전력 지령값에 따라 상기 복수의 발전장치들 각각에 무효전력 할당비율을 연산하는 단계를 포함한다.

[0014] 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법은 n개(n은 2 이상의 정수)의 풍력발전기가 케이블로 연결되어 어레이를 형성하고, 상기 n개의 풍력발전기와 어레이간의 연결부위에 n개의 노드가 형성되는 발전시스템에서 구현되고, 전력제어장치에 의해서 수행되는 무효전력제어방법으로서, 상기 어레이에 요구된 무효전력 지령값을 입력받는 단계 및 상기 무효전력 지령값에 따라 상기 n개의 풍력발전기들 각각에 무효전력 할당비율을 연산하는 단계를 포함하고, 상기 무효전력 할당비율($\frac{Q_{G,n+1}}{Q_{G,n}}$)은 $\frac{\eta_{n+1}(1-\eta_n)}{\eta_n}$ 을 이용하여 연산한다. 여기서, $Q_{G,n+1}$ 은 n+1번째 노드와 연결된 풍력발전기의 무효전력출력량, $Q_{G,n}$ 은 n번째 노드와 연결된 풍력

발전기의 무효전력출력량, $\eta_n = \frac{\sqrt{r_{n,n+1}}}{\sqrt{r_{H,n}} + \sqrt{r_{n,n+1}}}$, $r_{n,n+1}$ 는 n노드와 n+1노드 사이 저항, $r_{H,n}$ 은 n노드와 연결된 풍력발전기의 높이(H)사이의 저항이다.

발명의 효과

[0016] 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법은 발전단지의 최적화 과정을 통해 무효전력을 설정하여 유효전력 출력에 미치는 손실을 최소화할 수 있다.

[0017] 또한, 무효전력 출력 가용량을 지속적으로 반영할 수 있고, 무효전력 출력에 따른 손실을 선형화 과정을 통해 빠르게 고려할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법의 순서도이다.

도 2는 일반적인 풍력발전설비의 구성도이다.

도 3은 일반적인 풍력발전단지구조의 개략도이다.

도 4는 풍력발전단지의 구간별 저항성분을 고려한 개념도이다.

도 5는 PD제어방식의 무효전력 출력그래프이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 분배제어방식의 무효전력 출력그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020] 본 명세서에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시 예들에 대해서 특정한 구조적 또는 기능적 설명은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시 예들을 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로서, 본 발명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 형태들로 실시될 수 있으며 본 명세서에 설명된 실시 예들에 한정되지 않는다.

[0021] 본 발명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 변경들을 가할 수 있고 여러 가지 형태들을 가질 수 있으므로 실시 예들을 도면에 예시하고 본 명세서에서 상세하게 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명의 개념에 따른 실시 예들을 특정한 개시 형태들에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물, 또는 대체물을 포함한다.

[0022] 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 목적으로

만, 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.

[0023] 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.

[0024] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 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.

[0025] 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.

[0026] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법의 순서도이다.

[0027] 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법은 복수의 발전장치 각각이 케이블로 연결되어 어레이를 형성하는 발전시스템에서 구현되고, 전력제어장치에 의해서 수행되는 무효전력제어방법으로서, 발전장치의 무효전력 가용량을 계산하는 단계(S100), 어레이에 요구된 무효전력 지령값을 입력받는 단계(S200) 및 무효전력 지령값에 따라 복수의 발전장치들 각각에 무효전력 할당비율을 연산하는 단계(S300)를 포함한다.

[0028] 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법은 복수개의 발전장치를 케이블로 하나하나를 연결하여 어레이를 형성하고, 형성된 어레이에 놓여 있는 각각의 발전장치의 무효전력 가용량을 계산하는 단계(S100)를 포함한다.

[0029] 이러한 발전장치의 무효전력 가용량을 계산하는 것은 전력손실을 최소화하기 위한 무효전력 알고리즘 활성화를 위한 변수를 설정하기 위한 단계이다.

[0030] 어레이에 요구된 무효전력 지령값을 입력받는 단계(S200)는 설정된 무효전력 출력 가능량 안에서 계통 운영자로부터 요구되는 무효전력 지령값을 입력받아 발전단지에 전달할 수 있도록 할당 알고리즘을 구현하기 위한 단계이다.

[0031] 무효전력 지령값에 따라 복수의 발전장치들 각각에 무효전력 할당비율을 연산하는 단계(S300)는 하나의 어레이에서 요구되는 무효전력량을 가용하기 위해, 어레이에 연결되어 있는 각각의 발전장치의 무효전력 할당비율을 연산하는 단계이다. 각각의 발전장치의 무효전력을 할당비율은 각 발전장치가 연결되어 있는 케이블의 저항성분을 이용하여 복수의 발전장치 각각에 할당되는 무효전력 비율을 연산한다.

[0032] 이처럼 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법은 각 어레이별로 무효전력을 할당하는 과정에서 손실을 감소할 수 있도록 최적화 과정을 포함하며, 발전단지에서 발생할 수 있는 가용량 문제 등을 효과적으로 반영할 수 있다.

[0033] 이하 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법을 풍력발전의 예를 통해서 자세히 설명한다.

[0034] 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법은 VSC(Voltage Sourced Converter)를 이용하는 PMSG(Permanent Magnetic Synchronous Generators)의 PCS(Power Conversion System)제어신호 중 무효전력을 운영자가 입력하는데 있어, 풍력발전단지 손실을 최소화하는 방향으로 계산하는 방안에 대한 것이다.

[0035] 도 2는 일반적인 풍력발전설비의 구성도이다.

[0036] 도 3은 일반적인 풍력발전단지구조의 개략도이다.

[0037] 도 4는 풍력발전단지의 구간별 저항성분을 고려한 개념도이다.

[0038] 본 발명에서 실시예에 따른 무효전력제어방법은 도 2와 같이 풍력발전기로 이루어진 발전 단지에 최적화 과정을 통해 무효전력을 설정하여 유효전력 출력에 미치는 손실을 최소화하도록 한다.

[0039] 풍력발전설비를 예로 든 본 발명의 실시예에 따른 무효전력제어방법은 n개(n은 2 이상의 정수)의 풍력발전기가 케이블로 연결되어 어레이를 형성하고, 상기 n개의 풍력발전기와 어레이간의 연결부위에 n개의 노드가 형성되는 발전시스템에서 구현되고, 전력제어장치에 의해서 수행되는 무효전력제어방법으로서, 어레이에 요구된 무효전력 지령값을 입력받는 단계 및 무효전력 지령값에 따라 n개의 풍력발전기들 각각에 무효전력 할당비율을 연산하는

단계를 포함하고, 무효전력 할당비율($\frac{Q_{G,n+1}}{Q_{G,n}}$)은 $\frac{\eta_{n+1}(1-\eta_n)}{\eta_n}$ 을 이용하여 연산한다.

[0040] 여기서, $Q_{G,n+1}$ 은 n+1번째 노드와 연결된 풍력발전기의 무효전력출력량, $Q_{G,n}$ 은 n번째 노드와 연결된 풍력발전기의 무효전력출력량,

[0041] $\eta_n = \frac{\sqrt{r_{n,n+1}}}{\sqrt{r_{H,n}} + \sqrt{r_{n,n+1}}}$, $r_{n,n+1}$ 는 n노드와 n+1노드 사이 저항, $r_{H,n}$ 은 n노드와 연결된 풍력발전기의 높이(H)사이의 저항이다.

[0042] 도 3, 도4와 같이 본 발명의 실시예에 따른 풍력발전단지는 다기의 풍력발전기를 하나의 케이블로 묶어 어레이를 구성하여 중앙 변환소로 연계시키고, 전력공급은 단방향으로 이루어지게 된다. 중앙 변환소 인근의 케이블부터 마지막 풍력발전기의 케이블까지 케이블 특성이 다양하며, 각 구간의 전력조류에 의한 손실도 지속적으로 바뀌게 된다. 본 발명에서는 도 4와 같이 각 구간의 저항을 고려하여 무효전력 할당을 수행한다. 일반적으로 각 구간의 전력 흐름은 수학식 1, 수학식 2와 같이 계산된다.

[0043] [수학식 1]

$$P_n = P_{n+1} - r_{n,n+1} \frac{P_{n+1}^2 + Q_{n+1}^2}{V_{n+1}^2}$$

[0044]

[0045] [수학식 2]

$$Q_n = Q_{n+1} - X_{n,n+1} \frac{P_{n+1}^2 + Q_{n+1}^2}{V_{n+1}^2} + Q_{Cn}$$

[0046]

[0047] P_n 은노드 n에서의 유효전력, Q_n 은 노드 n에서의 무효전력, V_{n+1} 은 n+1노드에서 전압, $X_{n,n+1}$ 은 n노드와 n+1노드 사이의 리액턴스, Q_{Cn} 은 n노드에서 무효전력 입사량(injection)이다.

[0048] 도 4에 도시된 바와 같이 풍력발전기 노드들을 하나의 모선으로 고려할 때, 모선에서 가장 인접한 노드에서 해당모선까지의 무효전력 손실을 계산한다. 계산된 무효전력 손실과 어레이에 할당된 무효전력을 고려하여 연계된 풍력발전기와 남은 풍력발전기의 할당이 진행 되는데, 직접적으로 연계된 풍력발전기를 제외하고 남은 풍력발전기는 다음 노드까지의 임피던스 성분을 포함한 등가모델로 구성한다. 따라서 연계지점을 기점으로 직접적으로 연계된 풍력발전기와 잔여 발전기에 대한 무효전력 할당이 진행되고, 해당과정을 반복적으로 수행함으로써 각 연계지점에 대한 무효전력 손실 값을 할당 과정에 반영할 수 있다. 마지막 연계지점에서는 별도의 등가화 과정 없이 2기의 풍력발전기에 대하여 무효전력 할당을 수행한다. 해당 과정을 수식으로 나타내면 아래 수학식 3 내지 수학식 6과 같다.

[0049] [수학식 3]

$$Q_{req,n} = Q_{req,n-1} - Q_{loss,n-1} = Q_{Gn} + Q_{req,n+1}$$

[0050]

[0051] 여기서, $Q_{req,n}$ 은 노드 n에서의 무효전력요구량, $Q_{loss,n-1}$ 는 노드 n-1에서의 손실, $Q_{G,n}$ 는 노드 n에 연결된 풍력발전기의 무효전력출력량이다.

[0052] [수학식 4]

$$Q_{Gn} = \frac{\sqrt{r_{n,n+1}}}{\sqrt{r_{H,n}} + \sqrt{r_{n,n+1}}} (Q_{req,n-1} + Q_{loss,n-1}), \quad n=1, \dots, N-1$$

[0053]

[0054] [수학식 5]

$$Q_{req,n} = \frac{\sqrt{r_{H,n}}}{\sqrt{r_{H,n}} + \sqrt{r_{n,n+1}}} (Q_{req,n-1} + Q_{loss,n-1}), \quad n=1, \dots, N-1$$

[0055]

[0056] [수학식 6]

$$r'_{n,n+1} = r_{n,n+1} + r_{H,n+1}, \quad n = N-1$$

[0057]

[0058] $r'_{n,n+1}$ ($n=N-1$) 도4에서 마지막 풍력발전기가 연결되어 있는 케이블의 저항이다.

[0059] 무효전력 할당에 따른 손실에 대해 최적화 함수를 구현하고 반복적으로 적용하기 위해서는 복잡한 풍력발전기의 출력에 대한 선형화 과정이 필요하다. 목적함수의 대상이 되는 손실의 경우, 저항성분에 의해 발생한다. 따라서 풍력발전의 무효전력 할당과정을 풍력발전단지의 저항성분을 고려하여 비율로 나타내면 아래 수학식 7과 같다.

[0060] [수학식 7]

$$Q_{G,n} = \frac{\sqrt{r_{n,n+1}}}{\sqrt{r_{H,n}} + \sqrt{r_{n,n+1}}} \left(Q_{ref} - \sum_{l=0}^{n-1} Q_{G,l} + \sum_{l=0}^{n-1} Q_{loss,l} \right)$$

[0061]

[0062] Q_{ref} 는 무효전력 지령값이다.

[0064] 수학식 7과 같은 무효전력 지령에 의한 개별 발전기의 무효전력 출력량에 대해서, 인접한 풍력발전기에 각각 할당되는 무효전력의 비율을 수학식으로 표현하면 아래 수학식 8과 같다.

[0065] [수학식 8]

$$\frac{Q_{G,n+1}}{Q_{G,n}} = \frac{\eta_{n+1} \left(Q_{ref} - \sum_{l=0}^{n-1} Q_{G,l} + \sum_{l=0}^{n-1} Q_{loss,l} - Q_{G,n} + Q_{loss,n} \right)}{\eta_n \left(Q_{ref} - \sum_{l=0}^{n-1} Q_{G,l} + \sum_{l=0}^{n-1} Q_{loss,l} \right)}$$

[0066]

[0067] 여기서, $\eta_n = \frac{\sqrt{r_{n,n+1}}}{\sqrt{r_{H,n}} + \sqrt{r_{n,n+1}}}$ 이다.

[0069] 최종적으로, 각 어레이에 할당된 무효전력 요구량을 각 풍력발전기 출력 지령에 비율로 할당할 수 있으며, 해당 수식을 아래 수학식 9와 같이 간략화함으로서 선형화된 수식을 작성할 수 있다.

[0070] [수학식 9]

$$\begin{aligned}\frac{Q_{G \cdot n+1}}{Q_{G \cdot n}} &= \frac{\eta_{n+1}}{\eta_n} - \frac{\eta_{n+1} (Q_{G \cdot n} - Q_{loss \cdot n})}{\eta_n \left(Q_{ref} - \sum_{l=0}^{n-1} Q_{G \cdot l} + \sum_{l=0}^{n-1} Q_{loss \cdot l} \right)} \\ &= \frac{\eta_{n+1} (1 - \eta_n)}{\eta_n} + \frac{\eta_{n+1} \cdot Q_{loss \cdot n}}{\eta_n (Q_{req \cdot n-1} + Q_{loss \cdot n-1})} \\ &\cong \frac{\eta_{n+1} (1 - \eta_n)}{\eta_n} \quad (\because Q_{req} \gg Q_{loss})\end{aligned}$$

[0071]

[0072] 즉, 풍력발전기의 무효전력 출력에 대해 함수를 풀기 위해서는 각 어레이에 무효전력할당량에 대한 어레이 내부의 풍력발전기의 무효전력 출력량이 선형적으로 구성되어야 하는데, 위 수학식 9를 통해 임피던스 성분을 이용하여 풍력발전기별 무효전력 할당량을 비율로 설정하였다. 임피던스 성분은 연계지점 인근지역에서 멀어질수록 연계지점을 기준으로 많아지기 때문에, 해당 과정을 통해 인근 풍력발전기부터 무효전력 출력량이 높게 할당되게 된다. 그 결과 무효전력에 의한 손실을 낮출 수 있으며, 무효전력 요구량에 대해 오차를 최소화하여 대응할 수 있다.

[0073] 추가적으로 유효전력 출력량을 입력으로 받고 있기 때문에 PCS(power conversion system)용량을 고려한 제한치를 설정할 수 있으며, 계통의 상황에 좀 더 유연하게 대처할 수 있다.

[0075] 본 발명에서는 각 어레이와 발전기에 할당되는 무효전력에 의한 손실을 최소화하고자 하며 해당함수는 다음 수학식 10과 같다.

[0076] [수학식 10]

$$\text{Loss}(Q) = \text{Min} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N r_{n,n-1} \frac{P_{ref,l}^2 + Q_{ref,l}}{V_n^2}$$

[0077]

[0078] 해당함수(Loss)를 최소화하기 위해, 위 과정에서 선형화된 함수를 사용하여 증분 손실(Incremental loss)를 설정한다. 각 어레이의 무효전력 할당량을 바탕으로 전체 시스템에 대한 손실함수를 구성하면 다음 수학식 11과 같다.

[0079] [수학식 11]

$$\text{Loss}(Q) = \alpha Q_1^2 + \beta Q_2^2 + \dots + \gamma Q_L^2$$

[0080]

[0081] Loss(Q)는 공급되는 무효전력에 의한 풍력발전단지에서의 전체 전력손실이며, Q_1 은 특정 어레이에 할당된 무효전력량이다.

[0083] 전체 전력손실은 증분손실로 계산되어질 수 있고, 각 어레이에 대한 증분손실(Incremental loss) 동일 값을 아래 수학식 12를 통해 구할 수 있다.

[0084] [수학식 12]

$$\frac{dLoss}{dQ_1} = \frac{dLoss}{dQ_2} = \dots = \frac{dLoss}{dQ_L} = \lambda$$

[0085]

[0086] <실험예-시뮬레이션 결과>

[0087] 앞서 설명한 도 2와 같은 350MW(7MW/50기 풍력발전기) 풍력발전단지 구조를 갖는 시스템을 고려하여 기존 무효 전력분배방식인 비율분배제어(Proportional distribution-PD제어)과 본 발명의 알고리즘을 도입한 분배제어방식 각각에 의한 전력손실을 비교한다.

[0088] 도 5는 PD제어방식의 무효전력 출력그래프이다.

[0089] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 분배제어방식의 무효전력 출력그래프이다.

[0090] 도 5와 같이 일반적인 PD제어방식에 의한 무효전력 출력은 전체 5개의 풍력발전기(1001, 1002, 1003, 1004, 1005) 모두 같은 무효전력 출력을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

[0091] 도 6에 도시된 바와 같이 본 발명의 알고리즘에 의한 분배제어방식에 의하면 무효전력 출력은 전체 5개의 풍력발전기가 서로 다르고, 연계지점에 가장 가까운 위치에 있는 풍력발전기(1001)는 가장 높은 무효전력 출력을 나타내고 있으며, 연계지점에서 먼 위치에 있는 순서대로 무효전력 출력이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

[0092] 아래 표 1은 무효전력 할당량 변화에 따른 손실개선 비교표이다.

표 1

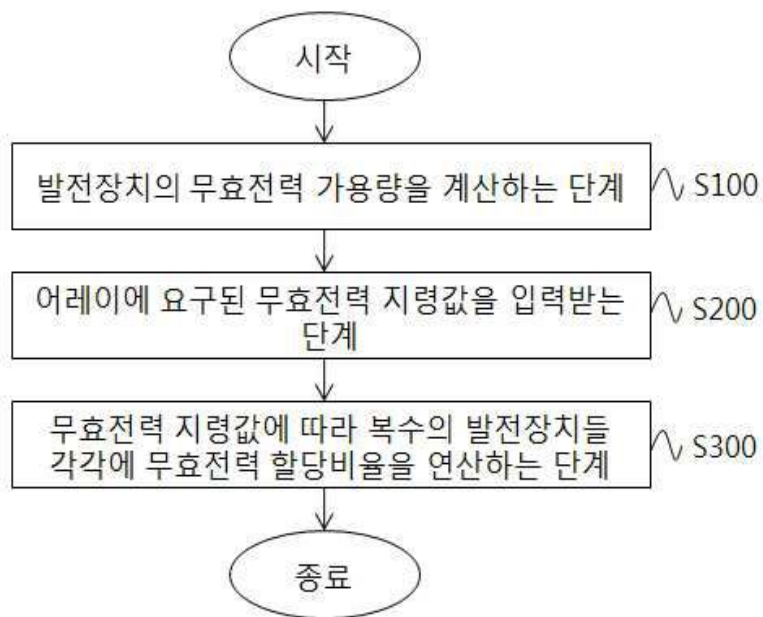
[0093]

무효전력 지령 입력값	50 MVAR	100 MVAR	115.0394 MVAR (0.95PF)	130 MVAR	150 MVAR	169.5127 MVAR (0.9PF)	180 MVAR
1초출력 평균 (PD분배)	348.0678 MVAR	348.0747 MVAR	348.0492 MVAR	348.0166 MVAR	347.969 MVAR	347.8983 MVAR	347.8473 MVAR
1초출력 평균 (본발명)	348.3178 MVAR	348.3682 MVAR	348.3658 MVAR	348.3701 MVAR	348.3633 MVAR	348.3229 MVAR	348.2917 MVAR
손실개선	250kW	293.5kW	316.6kW	353.5kW	394.3kW	424.6kW	444.4kW

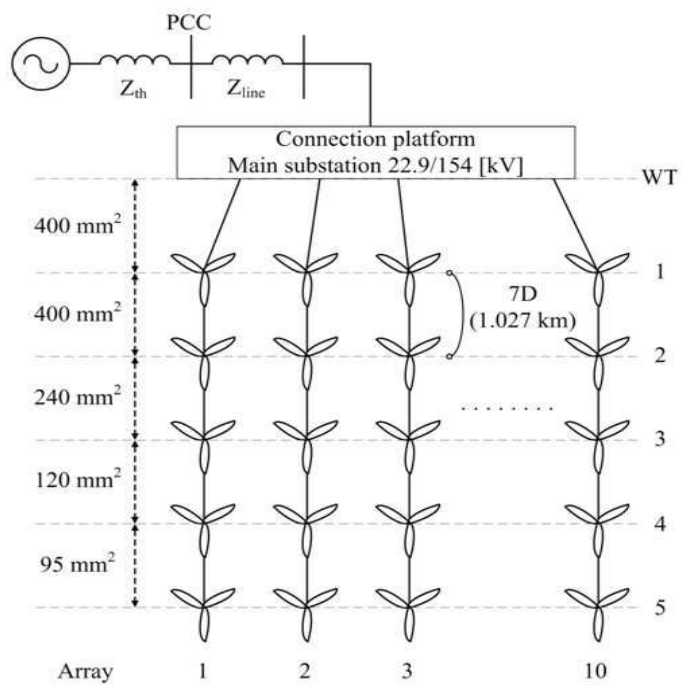
[0095] 위 도 2와 같은 풍력발전단지 구조를 갖는 시스템에서 기존 PD제어방식과 손실개선에 대한 결과를 보면, 기준가격(107.29원/kWh) 도입시 0.95PF기준 연간 약 3억원의 손실절감 효과가 있는 것을 확인할 수 있으며, 20년 수명 반영시 350MW기준 약 60억원의 비용절감효과가 있는 것을 위 표 1을 통해 알 수 있다.

도면

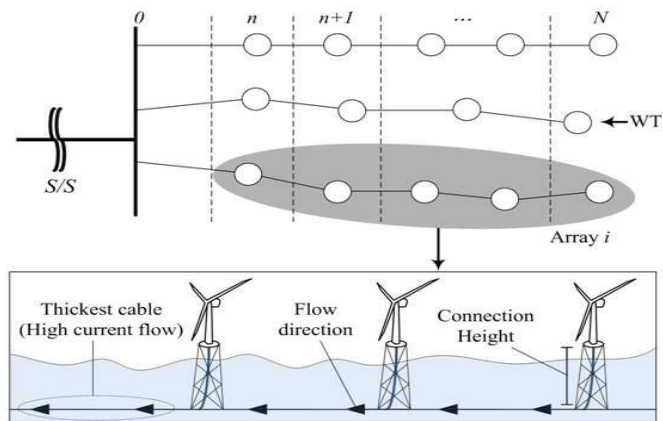
도면1



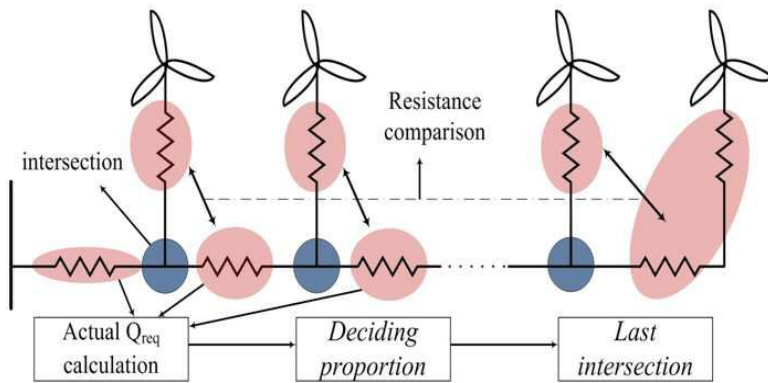
도면2



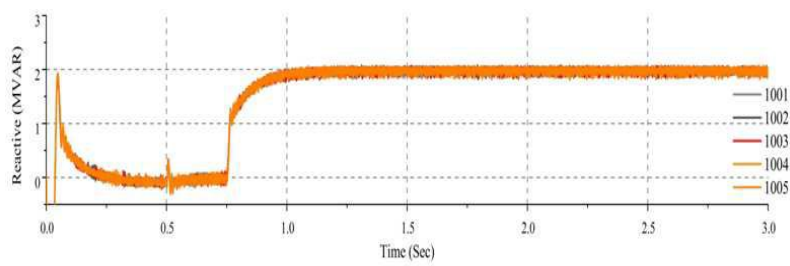
도면3



도면4



도면5



도면6

