



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0087026
(43) 공개일자 2022년06월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F03D 7/02 (2006.01) F03D 7/04 (2006.01)
(52) CPC특허분류
F03D 7/0284 (2013.01)
F03D 7/048 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0177340
(22) 출원일자 2020년12월17일
심사청구일자 2020년12월17일

(71) 출원인
인천대학교 산학협력단
인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동)
(72) 발명자
김학만
서울특별시 서대문구 성산로7길 45(연희동)
이운규
인천광역시 연수구 송도미래로 30, 송도 BRC 스마트밸리 지식산업센터 C동 905호(송도동)
느웬타이탄
인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동)
(74) 대리인
특허법인충정

전체 청구항 수 : 총 9 항

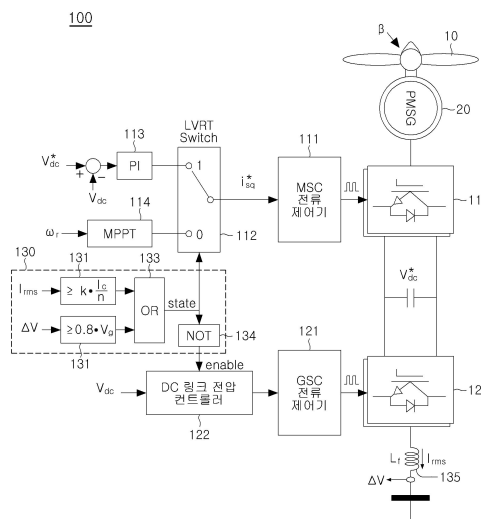
(54) 발명의 명칭 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템

(57) 요약

초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템은 고장 전류를 감지하여 MSC와 GSC의 고장 전류를 동시에 감소시켜 초전도 케이블의 온도 상승을 방지할 수 있다.

본 발명은 초전도 케이블을 고려한 LVRT 제어 방법을 적용할 수 있는 효과가 있고, HTS 케이블에 의해 그리드에 연결된 풍력 발전 단지의 LVRT 성능을 개선할 수 있는 효과가 있다.

대표도 - 도8



(52) CPC특허분류

F05B 2270/337 (2013.01)

Y02E 10/76 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2018007200
과제번호	R18XA03
부처명	한국전력공사 전력연구원
과제관리(전문)기관명	한국전력공사 전력연구원 기초연구센터
연구사업명	전력산업 기초연구 에너지 거점대학 클러스터
연구과제명	10MW급 초전도풍력발전기 기반 부유식 해상풍력발전 플랫폼용 기초기술개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	인천대학교 산학협력단
연구기간	2018.03.01 ~ 2021.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

발전기측 컨버터(Machine Side Converter, MSC)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 상기 MSC로 전송하여 상기 MSC의 유효전력과 무효전력을 제어하는 MSC 전류 제어기;

입력단이 비례 적분(Proportional Intergral, PI) 레귤레이터와, 최대 전력점 추적(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 제어를 수행하는 MPPT 컨버터에 연결되고, 출력단이 상기 MSC 전류 제어기에 연결되는 LVRT(Low Voltage Ride Through) 스위치;

계통측 컨버터(Grid Side Converter, GSC)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 상기 GSC로 전송하여 상기 GSC의 유효전력과 무효전력을 제어하는 GSC 전류 제어기;

상기 GSC 전류 제어기에 전기적으로 연결되고, 입력되는 DC 링크 전압을 제어하여 상기 GSC 전류 제어기의 DC 링크를 제어하는 DC 링크 전압 컨트롤러; 및

상기 LVRT 스위치와 상기 DC 링크 전압 컨트롤러에 전기적으로 연결하고, 상기 LVRT 스위치와 상기 DC 링크 전압 컨트롤러를 통해 상기 MSC 전류 제어기와 상기 GSC 전류 제어기를 제어하여 상기 MSC에서 발생된 제1 전류와 상기 GSC에서 발생된 제2 전류를 동시에 감소시키는 LVRT 컨트롤러를 포함하는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 GSC는 초전도 케이블에 의해 유틸리티 그리드에 연결되는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 LVRT 컨트롤러는 상기 GSC의 출력단에 연결된 출력 필터(L_f)의 RMS(root mean square) 전류(I_{rms})를 측정하고, 상기 출력 필터의 출력단 일측에 그리드 전압 강하를 측정하고, 하기의 수학적 식 1에 의해 측정된 RMS 전류 값이 초전도 전력의 임계 전류와 같거나 이상인 경우, 전류 오류를 판단하거나, 측정된 그리드 전압 강하가 기 설정된 일정한 전압과 같거나 이상인 경우, 전압 강하로 판단하여 상태 정보를 출력하는 고장 조건 판별부를 더 포함하는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템.

[수학적 식 1]

$$\text{state} = \begin{cases} 1 & \text{if } [(I_{rms} \geq k(I_C/n)) \text{ OR } (\Delta V \geq 0.8V_g)] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, I_{rms} 는 GSC의 RMS 전류, k 는 승압 변압기의 권선비, I_C 는 HTS(High Temperature Superconducting) 전력의 임계 전류, n 은 풍력 발전단지에 있는 WTG(Wind Turbine Generator)의 개수, ΔV 는 그리드 전압 강하이고, V_g 는 계통측 위상 전압(Grid Side Phase Voltage)임.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 고장 조건 판별부의 출력단에 OR 게이트가 전기적으로 연결되고, 상기 OR 게이트는 상기 LVRT 스위치의 동

작 제어 단자와 NOT 게이트에 병렬로 연결하고,

상기 NOT 게이트는 '0'일 때, 인에이블(Enable)되는 DC 링크 전압 컨트롤러에 전기적으로 연결되는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템.

청구항 5

청구항 4에 있어서,

상기 고장 조건 판별부는 측정된 RMS 전류값이 초전도 전력의 임계 전류와 같거나 이상인 경우 또는 측정된 그리드 전압 강하가 기설정된 일정한 전압과 같거나 이상인 경우 상기 상태 정보를 '1'로 출력하고,

상기 OR 게이트는 상기 고장 조건 판별부로부터 '1'의 상태 정보를 수신하여 상기 LVRT 스위치의 동작 제어 단자와 상기 NOT 게이트로 전송하는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 LVRT 스위치는 상기 OR 게이트로부터 '1'의 상태 정보를 수신하면, 상기 PI 레귤레이터에 연결하여 상기 PI 레귤레이터의 제어에 의해 dp 축 구성요소의 고정자 전류 레퍼런스를 상기 MSC 전류 제어기로 전송하고,

상기 NOT 게이트는 상기 OR 게이트로부터 수신한 '1'의 상태 정보를 '0'의 상태 정보로 변환하여 상기 DC 링크 전압 컨트롤러로 전송하는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템.

청구항 7

청구항 3에 있어서,

상기 LVRT 스위치는 평상시에 '0'의 상태 정보이고, 상기 MPPT 컨버터에 의해 전력을 최대로 얻을 수 있도록 PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)의 최대 전력점 추적(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 제어를 수행하는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템.

청구항 8

발전기측 컨버터(Machine Side Converter, MSC)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 상기 MSC로 전송하여 상기 MSC의 유효전력과 무효전력을 제어하는 MSC 전류 제어기;

입력단이 비례 적분(Proportional Integral, PI) 레귤레이터와, 최대 전력점 추적(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 제어를 수행하는 MPPT 컨버터에 연결되고, 출력단이 상기 MSC 전류 제어기에 연결되는 LVRT(Low Voltage Ride Through) 스위치;

계통측 컨버터(Grid Side Converter, GSC)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 상기 GSC로 전송하여 상기 GSC의 유효전력과 무효전력을 제어하는 GSC 전류 제어기;

상기 GSC 전류 제어기에 전기적으로 연결되고, 입력되는 DC 링크 전압을 제어하여 상기 GSC 전류 제어기의 DC 링크를 제어하는 DC 링크 전압 컨트롤러; 및

상기 LVRT 스위치와 상기 DC 링크 전압 컨트롤러에 전기적으로 연결하고, 상기 LVRT 스위치와 상기 DC 링크 전압 컨트롤러를 통해 상기 MSC 전류 제어기와 상기 GSC 전류 제어기를 제어하여 상기 MSC에서 발생된 제1 전류와 상기 GSC에서 발생된 제2 전류를 동시에 감소시키는 LVRT 컨트롤러를 포함하며,

상기 LVRT 컨트롤러는 상기 GSC의 출력단에 연결된 출력 필터(L_f)의 RMS(root mean square) 전류(I_{rms})를 측정하고, 상기 출력 필터의 출력단 일측에 그리드 전압 강하를 측정하고, 하기의 수학적 식 1에 의해 측정된 RMS 전류값이 초전도 전력의 임계 전류와 같거나 이상인 경우, 전류 오류를 판단하거나, 측정된 그리드 전압 강하가 기설정된 일정한 전압과 같거나 이상인 경우, 전압 강하로 판단하여 '1'의 상태 정보를 출력하고, 상기 '1'의 상태 정보를 상기 LVRT 스위치로 전송하며, 상기 '1'의 상태 정보를 '0'의 상태 정보로 변환하여 상기 DC 링크 전압 컨트롤러로 전송하는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템.

[수학식 1]

$$\text{state} = \begin{cases} 1 & \text{if } [(I_{rms} \geq k(I_C/n)) \text{ OR } (\Delta V \geq 0.8V_g)] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, I_{rms} 는 GSC의 RMS 전류, k 는 승압 변압기의 권선비, I_C 는 HTS(High Temperature Superconducting) 전력의 임계 전류, n 은 풍력 발전단지에 있는 WTG(Wind Turbine Generator)의 개수, ΔV 는 그리드 전압 강하이고, V_g 는 계통측 위상 전압(Grid Side Phase Voltage)임.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 GSC는 초전도 케이블에 의해 유틸리티 그리드에 연결되는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 LVRT 제어 시스템에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 고장 전류를 감지하여 MSC와 GSC의 고장 전류를 동시에 감소시켜 초전도 케이블의 온도 상승을 방지하는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 고온 초전도(High Temperature Superconducting, HTS) 케이블은 고전력 용량, 저전압 작동, 저임피던스, 통합 고장 전류 제한기와 같은 기존 케이블에 비해 다양한 이점을 제공하여 컴팩트한 크기와 고효율인 HTS 케이블이 대용량을 운반할 수 있도록 한다.
- [0003] HTS 케이블은 추가 변전소 건설이 불가능한 고부하 영역에 주로 사용된다.
- [0004] HTS 케이블의 또 다른 용도는 전송 용량 한계에 도달한 두 개의 기존 변전소를 연결하여 전력 전송 기능을 향상시킨다.
- [0005] 해상 풍력의 그리드 연결을 위한 HTS 케이블의 사용이 제안되었다. 해상 풍력 단지의 고전압 직류(High Voltage Direct Current, HVDC) 전송에 사용되는 DC HTS 케이블은 전압 안정성과 효율성을 향상시키는 이점을 제공한다.
- [0006] LVRT 제어 전략에 따라 HTS 케이블의 작동은 저전압 조건에서 과도 전류의 영향을 받을 수 있다. HTS 케이블의 급냉은 과도 전류가 임계 전류보다 높을 때 발생하여 초전도 상태가 손실되고 케이블 온도가 상승한다.
- [0007] 온도 상승이 심하면 초전도 상태를 회복하는데 오랜 시간이 걸린다. 이는 풍력 발전 단지 운영에 부정적인 영향을 미친다.
- [0008] 해상 풍력 단지의 개발은 육상 설치를 위한 토지 가용성 제한으로 인해 더 많은 관심을 받고 있다. 대용량 풍력을 유틸리티 그리드에 전달하는 세 가지 기술이 있다. 도 1에 도시된 바와 같이, 고전압 직류(HVDC) 전송 시스템은 풍력을 장기 전송에 적합한 유틸리티 그리드로 전송하는데 사용되고, 고전압 대체 전류(HVAC) 전송 시스템은 단거리에 적합한 솔루션이다.
- [0009] HVDC 전송의 높은 자본 비용과 HVAC 전송의 고전력 손실은 기존의 그리드 연결 방법의 한계가 될 수 있다. 초전도 기술의 빠른 발전과 함께 HTS 케이블의 사용은 저전압 수준에서 단거리에 대용량 풍력을 전송하는 유리한 방법이다. HTS 케이블은 전력 손실이 적은 기존 케이블보다 훨씬 더 높은 전력을 전송할 수 있다. HTS 케이블의 낮은 임피던스는 전력 손실을 줄일뿐 만 아니라 연결된 전력 시스템의 전압 프로파일을 개선한다.
- [0010] 도 1은 종래의 해상 풍력 발전 단지를 유틸리티 그리드에 연결은 3가지 형태를 나타낸 도면이다.
- [0011] 풍력 발전 단지를 유틸리티 그리드에 연결은 (a) 고전압 직류(HVDC) 전송이고, (b) 고전압 대체 전류(HVAC) 전송이며, (c) 고온 초전도(HTS) 케이블이다.

- [0012] 도 2는 종래의 풍력 터빈 발전기의 LVRT(Low Voltage Ride Through)의 크로바(저항)를 통한 전압 보호를 나타낸 도면이다.
- [0013] 도 2에 도시된 바와 같이, 고전력 저항과 BTB 컨버터의 DC 링크 커패시터와 병렬로 연결된 스위치로 구성된 크로바(Crowbar) 보호를 사용하는 LVRT 제어 방법의 일반적인 구성을 보여준다.
- [0014] 계통측에서 전압 오류가 발생되면, 크로바를 태워버려 풍력 터빈 발전기(WTG)의 초과 유효 전력을 고전력 저항기에서 소멸된다.
- [0015] 그러나 이러한 LVRT 제어 방법은 전압 복구를 원위치로 컨트롤하기 어려운 문제점이 있다.
- [0016] 도 3은 종래의 풍력 터빈 발전기의 LVRT 제어 방법을 나타낸 도면이다.
- [0017] MSC 컨트롤러는 WTG의 LVRT 작동을 개선하기 위해 부하 해제 기술로 설계된다. MSC의 q 축 전류 기준은 드롭(Droop) DC 링크 전압에 곱해진다.
- [0018] DC 링크 전압이 증가되면 기준 전류는 감소하여 오류 상태 동안 발전기측 전력과 DC 링크 전압이 감소된다.
- [0019] 그러나 LVRT 제어 방법은 디로딩(De Loading) 방식으로 MSC의 전류를 읽어와 MPPT 운전 제어를 수행하여 전류를 감소시키므로 응답 속도가 너무 느려 전압 제어가 용이하지 않는 단점이 있다.
- [0020] 도 2 및 도 3과 같은 LVRT 제어 방법은 풍력 발전 단지와 유틸리티 그리드의 연결에 초전도 케이블을 적용하는 경우, 온도에 민감하여 고장 전류를 신속하게 줄여야 한다.
- [0021] 그러나 종래의 LVRT 제어 방법은 고장 전류가 발생하면, DC 링크에 전력이 누적되면서 초전도 케이블의 온도를 상승시키는 문제점이 있으므로 초전도 케이블을 풍력 터빈 발전기에 적용하지 못한다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0022] (특허문헌 0001) 한국 등록특허번호 제10-1701293호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0023] 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 발명은 고장 전류를 감지하여 MSC와 GSC의 고장 전류를 동시에 감소시켜 초전도 케이블의 온도 상승을 방지하는 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템을 제공하는 데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0024] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 특징에 따른 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템은,
- [0025] 발전기측 컨버터(Machine Side Converter, MSC)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 상기 MSC로 전송하여 상기 MSC의 유효전력과 무효전력을 제어하는 MSC 전류 제어기;
- [0026] 입력단이 비례 적분(Proportional Integral, PI) 레귤레이터와, 최대 전력점 추적(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 제어를 수행하는 MPPT 컨버터에 연결되고, 출력단이 상기 MSC 전류 제어기에 연결되는 LVRT(Low Voltage Ride Through) 스위치;
- [0027] 계통측 컨버터(Grid Side Converter, GSC)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 상기 GSC로 전송하여 상기 GSC의 유효전력과 무효전력을 제어하는 GSC 전류 제어기;
- [0028] 상기 GSC 전류 제어기에 전기적으로 연결되고, 입력되는 DC 링크 전압을 제어하여 상기 GSC 전류 제어기의 DC 링크를 제어하는 DC 링크 전압 컨트롤러; 및
- [0029] 상기 LVRT 스위치와 상기 DC 링크 전압 컨트롤러에 전기적으로 연결하고, 상기 LVRT 스위치와 상기 DC 링크 전압 컨트롤러를 통해 상기 MSC 전류 제어기와 상기 GSC 전류 제어기를 제어하여 상기 MSC에서 발생된 제1 전류와

상기 GSC에서 발생된 제2 전류를 동시에 감소시키는 LVRT 컨트롤러를 포함한다.

- [0031] 본 발명의 특징에 따른 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템은,
- [0032] 발전기측 컨버터(Machine Side Converter, MSC)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 상기 MSC로 전송하여 상기 MSC의 유효전력과 무효전력을 제어하는 MSC 전류 제어기;
- [0033] 입력단이 비례 적분(Proportional Integral, PI) 레귤레이터와, 최대 전력점 추적(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 제어를 수행하는 MPPT 컨버터에 연결되고, 출력단이 상기 MSC 전류 제어기에 연결되는 LVRT(Low Voltage Ride Through) 스위치;
- [0034] 계통측 컨버터(Grid Side Converter, GSC)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 상기 GSC로 전송하여 상기 GSC의 유효전력과 무효전력을 제어하는 GSC 전류 제어기;
- [0035] 상기 GSC 전류 제어기에 전기적으로 연결되고, 입력되는 DC 링크 전압을 제어하여 상기 GSC 전류 제어기의 DC 링크를 제어하는 DC 링크 전압 컨트롤러; 및
- [0036] 상기 LVRT 스위치와 상기 DC 링크 전압 컨트롤러에 전기적으로 연결하고, 상기 LVRT 스위치와 상기 DC 링크 전압 컨트롤러를 통해 상기 MSC 전류 제어기와 상기 GSC 전류 제어기를 제어하여 상기 MSC에서 발생된 제1 전류와 상기 GSC에서 발생된 제2 전류를 동시에 감소시키는 LVRT 컨트롤러를 포함한다.

- [0037] 상기 LVRT 컨트롤러는 상기 GSC의 출력단에 연결된 출력 필터(L_f)의 RMS(root mean square) 전류(I_{rms})를 측정하고, 상기 출력 필터의 출력단 일측에 그리드 전압 강하를 측정하고, 하기의 수학적 식 1에 의해 측정된 RMS 전류 값이 초전도 전력의 임계 전류와 같거나 이상인 경우, 전류 오류를 판단하거나, 측정된 그리드 전압 강하가 기 설정된 일정한 전압과 같거나 이상인 경우, 전압 강하로 판단하여 '1'의 상태 정보를 출력하고, 상기 '1'의 상태 정보를 상기 LVRT 스위치로 전송하며, 상기 '1'의 상태 정보를 '0'의 상태 정보로 변환하여 상기 DC 링크 전압 컨트롤러로 전송한다.

- [0038] [수학적 식 1]

$$\text{state} = \begin{cases} 1 & \text{if } [(I_{rms} \geq k(I_C/n)) \text{ OR } (\Delta V \geq 0.8V_g)] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- [0039]
- [0040] 여기서, I_{rms} 는 GSC의 RMS 전류, k 는 승압 변압기의 권선비, I_C 는 HTS(High Temperature Superconducting) 전력의 임계 전류, n 은 풍력 발전단지에 있는 WTG(Wind Turbine Generator)의 개수, ΔV 는 그리드 전압 강하이고, V_g 는 계통측 위상 전압(Grid Side Phase Voltage)임.
- [0041] GSC는 초전도 케이블에 의해 유틸리티 그리드에 연결되어 있다.

발명의 효과

- [0042] 전술한 구성에 의하여, 본 발명은 초전도 케이블을 고려한 LVRT 제어 방법을 적용할 수 있는 효과가 있다.
- [0043] 본 발명은 HTS 케이블에 의해 그리드에 연결된 풍력 발전 단지의 LVRT 성능을 개선할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0044] 도 1은 종래의 해상 풍력 발전 단지를 유틸리티 그리드에 연결은 3가지 형태를 나타낸 도면이다.
- 도 2는 종래의 풍력 터빈 발전기의 LVRT(Low Voltage Ride Through)의 크로바(저항)를 통한 전압 보호를 나타낸 도면이다.
- 도 3은 종래의 풍력 터빈 발전기의 LVRT 제어 방법을 나타낸 도면이다.
- 도 4는 영구 자석 동기식 발전기를 기반으로 한 풍력 터빈 발전기의 구성을 나타낸 도면이다.
- 도 5는 영구 자석 동기식 발전기(PMSG)를 기반으로 한 풍력 터빈 발전기의 전력 흐름을 나타낸 도면이다.

도 6은 계통측 컨버터(Grid Side Converter, GSC) 전류 컨트롤러의 내부 구성을 나타낸 도면이다.

도 7은 발전기측 컨버터(Machine Side Converter, MSC) 전류 컨트롤러의 내부 구성을 나타낸 도면이다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템의 구성을 나타낸 도면이다.

도 9는 본 발명의 실시예에 따른 풍력발전단지와 유틸리티 그리드 간의 HTS 케이블을 연결한 모습을 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0045] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.
- [0046] 풍력 발전 단지의 그리드 연결에 고압 HTS 케이블을 사용하면, 상당한 전력 전송 손실을 줄일 수 있다.
- [0047] 풍력 발전 단지용 HTS 케이블 솔루션의 기술 및 경제적 평가는 $\pm 150\text{kV}$ DC HTS 전송을 사용하는 것이 경쟁력 있는 솔루션이라는 것을 보여준다.
- [0048] 또한, 풍력 전송에서 중전압 AC HTS 케이블을 사용하면, 고전력 변압기와 AC/DC 컨버터 시스템이 없기 때문에 해상 풍력 단지의 자본 비용을 줄일 수 있다.
- [0049] 풍력 발전 단지에 HTS 케이블을 사용하는 것은 풍력 발전 시스템의 저전압 승차(Low Voltage Ride Through, LVRT) 작동 중에 HTS 케이블을 통한 높은 과도 전류를 처리한다. 풍력 발전 단지는 저전압의 짧은 기간 동안 전력망에 연결 상태를 유지해야 하므로 다양한 LVRT 제어 전략이 제안된다.
- [0050] HTS 케이블은 짧은 기간 동안 높은 고장 전류를 유지하도록 설계되었지만, LVRT 제어 전략은 HTS 케이블 작동을 고려하여 설계되어야 한다. 본 발명은 HTS 케이블 동작을 고려한 LVRT 제어 전략의 설계를 제공한다.
- [0051] 첫 번째는 크로바 보호 및 WTG 변환기의 조정된 제어이고, 두 번째는 HTS 케이블에 의해 그리드에 연결된 풍력 발전 단지의 LVRT 성능을 개선하기 위한 효과적인 조정 제어를 제안한다.
- [0052] 본 발명은 영구 자석 동기식 발전기(PMSG)를 기반으로 한 풍력 발전 단지를 고려한다.
- [0053] PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator) 기반 WTG의 컨버터 컨트롤러가 제공된다.
- [0055] 도 4는 영구 자석 동기식 발전기를 기반으로 한 풍력 터빈 발전기의 구성을 나타낸 도면이다.
- [0056] 유틸리티 그리드에서 오류가 발생하면 전압 강하가 그리드 전류를 증가시켜 일정한 전력을 유지한다. 그러나 출력 전류는 BTB(back-to-back) 컨버터의 기능에 의해 제한되므로 그리드(P_G)에 주입되는 전력이 감소한다.
- [0057] 한편, 풍력(P_M)은 고장이 발생하는 동안 지속적으로 유지된다. 도 4에 도시된 WTG의 전력 균형에 따르면 하기의 수학적 식 1, 수학적 식 2에 의해 주어진 BTB 컨버터의 DC 링크 전력이 점진적으로 증가하여 DC 링크 전압이 증가한다.

수학적 식 1

$$P_{DC} = P_M - P_G$$

수학적 식 2

$$P_{DC} = V_{dc}C \frac{dv_{dc}}{dt}$$

[0060] DC 링크 전압이 크게 증가하여 WTG가 중단되는 경우 BTB 컨버터를 종료해야한다. 따라서, WTG 컨트롤러는 오류 상태에서 WTG의 작동을 유지하도록 적절하게 설계 되어야 한다.

[0062] 도 5는 영구 자석 동기식 발전기(PMSG)를 기반으로 한 풍력 터빈 발전기의 전력 흐름이다.

[0063] 풍력 터빈 발전기(PM)에서 포착된 지속적인 풍력은 그리드 전류를 크게 증가시킨다.

[0064] 해상 풍력 단지가 HTS 케이블에 의해 유틸리티 그리드에 연결되는 경우, HTS 케이블을 통한 총 전류가 임계 전류를 초과하여 급내 상태가 될 수 있다. 결과적으로 HTS 케이블 작동이 복구되면 풍력 발전 단지가 중단된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 발명에서는 HTS 전원 케이블의 특성을 고려하여 LVRT 성능을 향상시키기 위한 WTG의 조정 제어를 제안한다.

[0065] PMSG를 기반으로 한 유형 4 WTG의 일반적인 구성은 도 5에 나와 있습니다.

[0066] 여기서, BTB 컨버터는 WTG를 제어하는데 사용되고, 승압 변압기는 WTG를 그리드에 연결하는데 사용된다.

[0067] BTB 컨버터는 발전기측 컨버터(Machine Side Converter, MSC)(110)와 계통측 컨버터(Grid Side Converter, GSC)(120)의 두 가지 컨버터로 구성됩니다. 인덕턴스 필터(Lf)를 통해 승압 변압기에 연결되는 GSC(120)는 BTB 컨버터의 DC 링크 전압을 조절하는 역할을 한다. PMSG와 연결된 MSC(110)는 WTG의 속도 또는 토크 제어를 담당한다. 또한, 피치 각도 제어는 극한 풍속에서도 WTG 작동을 유지하는데 사용된다.

[0068] MSC(110)와 GSC(120)는 3상 2레벨 전압 소스 컨버터를 기반으로 하며, 각 위상에서 2개의 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(IGBT)로 구성된다.

[0069] IGBT의 내부 저항을 무시하고, GSC(120)의 역학 방정식은 다음의 공간 위상 방정식인 수학식 3에 의해 설명된다.

수학식 3

$$L_f \frac{d\vec{i}_g}{dt} = \vec{V}_t - \vec{V}_g$$

[0070]

[0071] 여기서, L_f 은 인덕턴스 필터, $\vec{V}_t$ 은 터미널 GSC 전압의 공간 페이저(Phasor), $\vec{V}_g$ 는 출력 필터 전압의 공간 페이저(Phasor), $\vec{i}_g$ 은 그리드 전류의 공간 페이저(Phasor)이다.

[0072] dp 참조 프레임, $\vec{f} = (f_d + jf_q)e^{j\rho}$ 에서 공간 페이저의 표현을 고려할 때, 동적 방정식인 수학식 3은 아래의 수학식 4와 수학식 5에 의해 실수와 허수의 구성요소들을 표현할 수 있다.

수학식 4

$$L_f \frac{di_{gd}}{dt} = L_f \frac{d\rho}{dt} i_{gq} + V_{td} - V_{gd}$$

[0073]

수학식 5

$$L_f \frac{di_{gq}}{dt} = -L_f \frac{d\rho}{dt} i_{gd} + V_{tq} - V_{gq}$$

[0074]

[0075] 여기서, V_{td} and V_{tq} 는 터미널 GSC 전압의 dp 축 구성요소이고, V_{gd} and V_{gq} 는 출력 필터 전압의 dp 축 구성요소이고, i_{gd} and i_{gq} 는 필터 전류의 dp 축 구성요소이며, ρ 는 그리드 전압의 공간 페이저 각도이다.

[0076] PLL(Phase-Locked Loop) 메카니즘은 $\omega_g t + \theta_0$ 에서 ρ 를 조절하는데 사용되기 때문에, 수학적 4와 수학적 5는 하기의 수학적 6과 수학적 7로 주어질 수 있다.

수학적 6

[0077]
$$L_f \frac{di_{gd}}{dt} = L_f \omega_g i_{gq} + V_{td} - V_{gd}$$

수학적 7

[0078]
$$L_f \frac{di_{gq}}{dt} = -L_f \omega_g i_{gd} + V_{tq} - V_{gq}$$

[0079] 여기서, ω_g 는 그리드 각도 주파수, θ_0 는 그리드 전압의 초기 각도이다.

[0080] 터미널 GSC 전압의 dp 축 구성요소(V_{td} and V_{tq})는 수학적 8과 수학적 9에 의해 주어진 바와 같이, 비례 상수인 $V_{dc}/2$ 에 의해 변조 신호(m_{gd} and m_{gq})가 선형적으로 비례한다. m_{gd} and m_{gq} 는 MSC의 변조 신호의 dp 축 구성요소이고, V_{dc} 는 DC 링크 전압이다.

수학적 8

[0081]
$$V_{td} = \frac{V_{dc}}{2} m_{gd}$$

수학적 9

[0082]
$$V_{tq} = \frac{V_{dc}}{2} m_{gq}$$

[0083] $L_f \omega_g$ 용어의 존재하기 때문에 dp 전류($i_{gd}; i_{gq}$)의 역학은 짝을 이룬다. 변조 신호는 역학을 분리하기 위해 하기의 수학적 10과 수학적 11에 의해 정의된다.

수학식 10

$$m_{gd} = \frac{2}{V_{dc}} (u_{gd} - \omega_g L_f i_{gq} + V_{gd})$$

수학식 11

$$m_{gq} = \frac{2}{V_{dc}} (u_{gq} + \omega_g L_f i_{gd} + V_{gq})$$

여기서, u_{gd} and u_{gq} 는 새로운 제어 입력으로 GSC(120)의 제어 입력들의 dp 축 구성요소이다.

수학식 8과 수학식 9에서 변조 신호(m_{gd} and m_{gq})로 대체하고, 수학식 6과 수학식 7에서 터미널 GSC 전압의 dp 축 구성요소(V_{td} and V_{tq})로 대체하면, 다음의 수학식 12와 수학식 13을 형성한다.

수학식 12와 수학식 13은 그리드 전류의 출력 dp 축 구성요소(i_{gdq})가 u_{gd} and u_{gq} 에 의해 제어될 수 있다.

수학식 12

$$L_f \frac{di_{gd}}{dt} = u_{gd}$$

수학식 13

$$L_f \frac{di_{gq}}{dt} = u_{gq}$$

PI(Proportional Integral) 레귤레이터들은 다음의 수학식 14와 수학식 15의 제어 신호들(u_{gd} and u_{gq})을 생성하는데 사용된다.

수학식 14

$$u_{gd} = k_{pd}^{gi} (i_{gd}^* - i_{gd}) + k_{id}^{gi} \int (i_{gd}^* - i_{gd}) dt$$

수학식 15

$$u_{gq} = k_{pq}^{gi} (i_{gq}^* - i_{gq}) + k_{iq}^{gi} \int (i_{gq}^* - i_{gq}) dt$$

여기서, k_{pd}^{gi} , k_{pq}^{gi} , k_{id}^{gi} , and k_{iq}^{gi} 는 PI 레귤레이터들의 파라미터이고, i_{gd}^* and i_{gq}^* 는 전류 기준값(Reference)을 나타낸다.

수학식 14와 수학식 15의 제어 신호들(u_{gd} and u_{gq})을 수학식 10과 수학식 11에 대입하면 다음의 수학식 16과 수학식 17을 형성한다.

수학식 16

$$m_{gd} = \frac{2}{V_{dc}} (V_{gd} - \omega_g L_f i_{gd} + k_{pd}^{gi} (i_{gd}^* - i_{gd}) + k_{id}^{gi} \int (i_{gd}^* - i_{gd}) dt)$$

수학식 17

$$m_{gd} = \frac{2}{V_{dc}} (V_{gd} - \omega_g L_f i_{gd} + k_{pd}^{gi} (i_{gd}^* - i_{gd}) + k_{id}^{gi} \int (i_{gd}^* - i_{gd}) dt)$$

전류 기준값(i_{gd}^* and i_{gq}^*)은 출력 DC 전압과 무효 전력 제어 루프에 의해 제공되고, 다음의 수학식 18과 수학식 19와 같다.

수학식 18

$$i_{gd}^* = k_{pd}^{gV} (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_{id}^{gV} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt$$

수학식 19

$$i_{gq}^* = k_{pd}^{gQ} (Q^* - Q) + k_{id}^{gQ} \int (Q^* - Q) dt$$

여기서, k_{pd}^{gV} , k_{pq}^{gQ} , k_{id}^{gV} , and k_{iq}^{gQ} 는 PI 레귤레이터들의 파라미터들이고, V_{dc} 는 BTB 컨버터에서 측정된 DC 링크 전압이고, V_{dc}^* 는 DC 링크 전압의 기준값이고, Q 는 측정된 출력 무효 전력이고, Q^* 는 출력 무효 전력의 기준값을 나타낸다.

수학식 16 내지 수학식 19는 GSC 전류 컨트롤러(121)의 블록 표현은 도 6에 도시되어 있다.

도 6 및 도 7은 백투백 컨버터 컨트롤러이고, 도 6은 계통측 컨버터(Grid Side Converter, GSC) 전류 컨트롤러의 내부 구성을 나타낸 도면이고, 도 7은 발전기측 컨버터(Machine Side Converter, MSC) 전류 컨트롤러의 내부 구성을 나타낸 도면이다.

PMSG의 역학 전압 방정식은 다음의 수학식 20과 수학식 21과 같다.

수학식 20

$$L_d \frac{di_{sd}}{dt} = V_{sd} + \omega_r L_q i_{sq} - R_s i_{sd}$$

수학식 21

$$L_q \frac{di_{sq}}{dt} = V_{sq} - \omega_r L_d i_{sd} - R_s i_{sq} - \omega_r \lambda_{PM}$$

여기서, R_s 는 스테이터 저항, ω_r 는 로터 각도 주파수, λ_{PM} 는 PMSG의 자속, i_{sd} and i_{sq} 는 스테이터 전류의 dp 축(axix) 구성요소들, L_d and L_q 는 스테이터 인덕턴스들의 dp 축 구성요소들, V_{sd} and V_{sq} 는 스테이터 전압의 dp 축 구성요소들이고, 수학식 22와 수학식 23과 같은 변조 신호들 (m_{sd} and m_{sq})에 비례한다.

수학식 22

$$V_{sd} = \frac{V_{dc}}{2} m_{sd}$$

수학식 23

$$V_{sq} = \frac{V_{dc}}{2} m_{sq}$$

PMSG의 dp-스테이터 전류들은 $\omega_r L_d$ 와 $\omega_r L_q$ 의 존재로 인해 결합되어 있음을 볼 수 있다.

수학식 24와 수학식 25에 의해 주어진 변조 신호는 역할을 분리하기 위해 도입된다.

수학식 24

$$m_{sd} = \frac{2}{V_{dc}} (u_{sd} - \omega_r L_q i_{sq})$$

수학식 25

$$m_{sq} = \frac{2}{V_{dc}} (u_{sd} + \omega_r L_d i_{sd} + \omega_r \lambda_{PM})$$

[0115] 여기서, u_{sd} and u_{sq} 는 제어 입력들이고, PI 레귤레이터들에 의해 생성되며, 다음의 수학식 26과 수학식 27과 같다.

수학식 26

$$[0116] \quad u_{sd} = k_{pd}^{si}(i_{sd}^* - i_{sd}) + k_{id}^{si} \int (i_{sd}^* - i_{sd}) dt$$

수학식 27

$$[0117] \quad u_{sq} = k_{pq}^{si}(i_{sq}^* - i_{sq}) + k_{iq}^{si} \int (i_{sq}^* - i_{sq}) dt$$

[0118] 여기서, k_{pd}^{si} , k_{pq}^{si} , k_{id}^{si} and k_{iq}^{si} 는 PI 레귤레이터들의 파라미터이고, i_{sd}^* and i_{sq}^* 는 출력 제어 루프에 의해 제공된 전류 기준값이다.

[0119] 수학식 26과 수학식 27의 제어 입력들을 수학식 24와 수학식 25에 대입하면, 수학식 28과 수학식 29를 생성한다.

수학식 28

$$[0120] \quad m_{sd} = \frac{2}{V_{dc}} \left(-\omega_r L_q i_{sq} + k_{pd}^{si}(i_{sd}^* - i_{sd}) + k_{id}^{si} \int (i_{sd}^* - i_{sd}) dt \right)$$

수학식 29

$$[0121] \quad m_{sq} = \frac{2}{V_{dc}} \left(\omega_r \lambda_{PM} + \omega_r L_d i_{sd} + k_{pq}^{si}(i_{sq}^* - i_{sq}) + k_{iq}^{si} \int (i_{sq}^* - i_{sq}) dt \right)$$

[0122] 도 7은 수학식 28과 수학식 29를 기초로 한 MSC 전류 컨트롤러의 블록 표현을 나타내고, 전류 제어와 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 루프를 포함한다. 전류 기준값(i_{sd}^*)은 0으로 설정하고, i_{sq}^* 는 다음의 수학식 30과 같다.

[0123] 전류 기준값(i_{sd}^*)은 스테이터 전류 기준값의 dp 축 구성요소이다.

수학식 30

$$[0124] \quad i_{sq}^* = \frac{2}{3} \frac{T_e^*}{p \lambda_{PM}}$$

[0125] 여기서, p는 극쌍의 개수이고, T_e^* 는 MPPT 컨트롤러의 최적 토크 기준을 나타낸다.

[0126] MPPT를 기반으로 한 팁 속도 비율은 하기의 수학적식 31에 기반으로 의해 사용한다.

수학적식 31

[0127]
$$T_e^* = -k_{opt}\omega_r^2$$

수학적식 32

[0128]
$$k_{opt} = \frac{0.5\rho AR^3 C_{pmax}}{\lambda_{opt}} \omega_r^3$$

[0129] 여기서, A는 터빈 청소 영역이고, ρ 는 공기 질량 밀도이고, R은 터빈 블레이드 반경이고, C_{pmax} 는 최대 성능 계수이고, λ_{opt} 는 블레이드 피치 각도가 0일 때($\beta=0$), 최적의 팁 속도 비율을 나타낸다.

[0131] 도 8은 본 발명의 실시예에 따른 초전도케이블을 고려한 풍력발전단지의 LVRT 제어 시스템의 구성을 나타낸 도면이고, 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 풍력발전단지와 유틸리티 그리드 간의 HTS 케이블을 연결한 모습을 나타낸 도면이다.

[0132] 영구 자석형 동기 발전기(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG(20)는 풍력 발전 시뮬레이터를 통해 생성된 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환한다.

[0133] 플라이휠 조립체(10)의 피치 제어로 입력된 기계적 토크는 PMSG(20)와 발전기측 컨버터(MSC)(110)를 거쳐 전기 에너지로 변환되고, 변환된 전기에너지는 계통측 컨버터(GSC)(120)를 통하여 계통으로 공급된다. 이때, 발전기측 컨버터(110)는 최적의 출력을 내기 위해 회전자의 속도를 제어하고, 계통측 컨버터(120)는 주파수 변환 및 역률 제어를 수행한다.

[0134] 플라이휠 조립체(101)는 회전 에너지를 운동 에너지로 저장하고 회전자 측 상에 배치된다.

[0135] 발전기측 컨버터(Machine Side Converter, MSC)(110)는 플라이휠 조립체(10)에서 발생하는 전력을 제어하고, 계통측 컨버터(Grid Side Converter, GSC)(120)는 유틸리티 그리드(30)에 연결되어 유틸리티 그리드(30)의 전력 시스템의 전력을 제어한다.

[0136] MSC(110)는 플라이휠 조립체(10)에서 발생하는 유효전력과 무효전력을 제어하며, GSC(120)는 유틸리티 그리드(30)의 전력 시스템의 유효전력과 무효전력을 제어한다.

[0137] MSC(110)와 GSC(120)는 실제적으로 인버터와 컨버터의 동작을 수행한다.

[0138] MSC(110)는 계통과 연계되거나 계통에 연계되지 않을 때 플라이휠 조립체(10)에서 발생하는 출력량의 변동을 완화시키는 기능을 수행한다.

[0139] GSC(120)는 유틸리티 그리드(30)와 연결되어 유틸리티 그리드(30)의 전력 시스템과 계통이 끊어졌을 때 일정한 주파수를 제어하도록 하는 기능을 수행한다.

[0140] MSC 전류 제어기(111)는 MSC(110)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 MSC(110)로 전송하여 MSC(110)의 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있다.

[0141] MSC 전류 제어기(111)는 MSC(110)의 전류 제어를 통해 PMSG(20)의 회전자를 제어하고, 플라이휠 조립체(10)에서 생성되는 에너지의 최대점을 찾아 발전을 수행할 수 있다.

[0142] LVRT 스위치(112)는 입력단이 비례 적분(Proportional Integral, PI) 레귤레이터(113)와 MPPT 컨버터(114)에

연결되고, 출력단이 MSC 전류 제어기(111)에 연결되어 있다.

- [0143] LVRT 스위치(112)는 MSC 전류 제어기에 전기적으로 연결되고, LVRT 스위치(112)의 온 신호가 입력되면, PI 레귤레이터(113)의 제어에 의해 dp 축 구성요소의 고정자 전류 레퍼런스를 MSC 전류 제어기(111)로 전송한다.
- [0144] 비례 적분(Proportional Intergral, PI) 레귤레이터(113)는 LVRT 스위치(112)에 연결되어 DC 링크 전압과 DC 링크 전압 레퍼런스의 전압 오차값을 입력받아 dp 축 구성요소의 고정자 전류 레퍼런스를 LVRT 스위치(112)를 통해 MSC 전류 제어기로 출력한다.
- [0145] LVRT 스위치(112)는 오프 신호가 입력되면, 전력을 최대로 얻을 수 있도록 PMSG(20)의 최대 전력점 추적(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 제어를 수행하는 MPPT 컨버터(114)에 연결된다.
- [0146] MPPT 컨버터(114)는 LVRT 스위치(112)의 오프 신호가 입력되면, MSC 전류 제어기(111)에 연결된다.
- [0147] GSC 전류 제어기(121)는 GSC(120)에 전기적으로 연결되어 유효전력 제어신호와 무효전력 제어신호를 GSC(120)로 전송하여 GSC(120)의 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있다.
- [0148] GSC(120)는 DC 링크 제어와, 생성된 전력의 계통 동기화 기능을 수행한다.
- [0149] DC 링크 전압 컨트롤러(122)는 GSC 전류 제어기(121)에 전기적으로 연결되고, 입력되는 DC 링크 전압을 제어하여 GSC 전류 제어기(121)의 DC 링크를 제어한다.
- [0150] GSC(120)는 DC 링크의 전압을 유지하여 PMSG(20)에서 생성되는 전기 에너지를 DC 링크의 손실없이 계통으로 전달되게 한다.
- [0151] LVRT 컨트롤러(130)는 고장 조건 판별부(131), OR 게이트(133), NOT 게이트(134)를 포함한다.
- [0152] 고장 조건 판별부(131)의 출력단에 OR 게이트(133)가 전기적으로 연결되고, OR 게이트(133)는 LVRT 스위치(112)의 동작 제어 단자와 NOT 게이트(134)에 병렬로 연결된다. NOT 게이트(134)는 '0'일 때 인에이블(Enable)되는 DC 링크 전압 컨트롤러(122)에 전기적으로 연결된다.
- [0153] NOT 게이트(134)는 입력단이 NOT 게이트(134)에 연결되고, 출력단이 DC 링크 전압 컨트롤러(122)에 연결된다.
- [0154] 고장 조건 판별부(131)는 GSC(120)의 출력단에 연결된 출력 필터(L_f)(135)의 RMS(root mean square) 전류(I_{rms})를 측정하고, 출력 필터(135)의 출력단 일측에 그리드 전압 강하를 측정하고, 하기의 수학적 식 33에 의해 측정한 RMS 전류값이 초전도 전력의 임계 전류와 같거나 이상인 경우, 전류 오류를 판단하거나, 측정한 그리드 전압 강하가 기설정된 일정한 전압과 같거나 이상인 경우, 전압 강하로 판단하여 상태 정보를 출력한다.
- [0155] 일반적으로 LVRT 스위치(112)는 최대 풍력을 캡처하기 위해 상태(state) 0에 있는 반면, GSC(120)는 DC 링크 전압을 제어한다.
- [0156] LVRT 스위치(112)의 상태는 전압 강하 또는 전류 오류가 감지되면 0에서 1로 변경된다.
- [0157] 본 발명의 LVRT 제어 방법은 풍력 발전 단지의 LVRT 제어 시스템(100)의 GSC(120)와 유틸리티 그리드(30)의 연결에 초전도 케이블(40)을 적용하는 경우, 온도에 민감하여 고장 전류를 신속하게 줄여야 한다.
- [0158] LVRT 컨트롤러(130)는 LVRT 스위치(112)와 DC 링크 전압 컨트롤러(122)에 전기적으로 연결하고, LVRT 스위치(112)와 DC 링크 전압 컨트롤러(122)를 통해 MSC 전류 제어기(111)와 GSC 전류 제어기(121)를 제어하여 MSC(110)에서 발생된 제1 전류와 GSC(120)에서 발생된 제2 전류를 동시에 감소시킨다.
- [0159] LVRT 컨트롤러(130)는 MSC(110)와 GSC(120)의 고장 전류를 동시에 감소하여 초전도 케이블(40)의 고장 전류를 빠르게 줄이고, 이에 따라 초전도 케이블(40)의 온도 상승을 방지할 수 있다.
- [0160] 본 발명은 초전도 케이블(40)을 고려한 LVRT 제어 방법을 적용할 수 있는 효과가 있다.
- [0161] 본 발명의 LVRT 컨트롤러(130)는 풍력(P_M)을 줄이고 고장 상태에서 DC 링크 전압을 공칭값(nominal value)으로 안정적으로 조절하여 HTS 케이블(40)의 전류를 줄이는 것을 목표로 한다.
- [0162] HTS 케이블(40)의 퀘칭(Quenching) 현상이 발생하지 않아 풍력 발전 단지의 운영이 빠르게 회복된다.
- [0163] 퀘칭은 초전도 물질이 초전도 현상을 유지하기 위해서 임계 온도 이하가 되어야 하는데, 이러한 임계 조건(임계

전류 등)이 무너져서 초전도체가 초전도성을 상실하고, 상전도 상태가 되는 현상을 말한다.

[0164] 퀘칭이 발생되면, 상전도 상태의 전기 저항으로 대량의 열이 발생하고, 초전도체를 용해시키거나 값비싼 냉각제를 증발시키는 손실이 발생한다.

수학식 33

$$\text{state} = \begin{cases} 1 & \text{if } [(I_{rms} \geq k(I_C/n)) \text{ OR } (\Delta V \geq 0.8V_g)] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0165] 여기서, I_{rms} 는 GSC의 RMS 전류, k 는 승압 변압기의 권선비, I_C 는 HTS(High Temperature Superconducting) 전력의 임계 전류, n 은 풍력 발전단지에 있는 WTG(Wind Turbine Generator)의 개수, ΔV 는 그리드 전압 강하이고, V_g 는 계통측 위상 전압(Grid Side Phase Voltage)을 나타낸다.

[0167] 이상에서 본 발명의 실시예는 장치 및/또는 방법을 통해서만 구현이 되는 것은 아니며, 본 발명의 실시예의 구성에 대응하는 기능을 실현하기 위한 프로그램, 그 프로그램이 기록된 기록 매체 등을 통해 구현될 수도 있으며, 이러한 구현은 앞서 설명한 실시예의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야의 전문가라면 쉽게 구현할 수 있는 것이다.

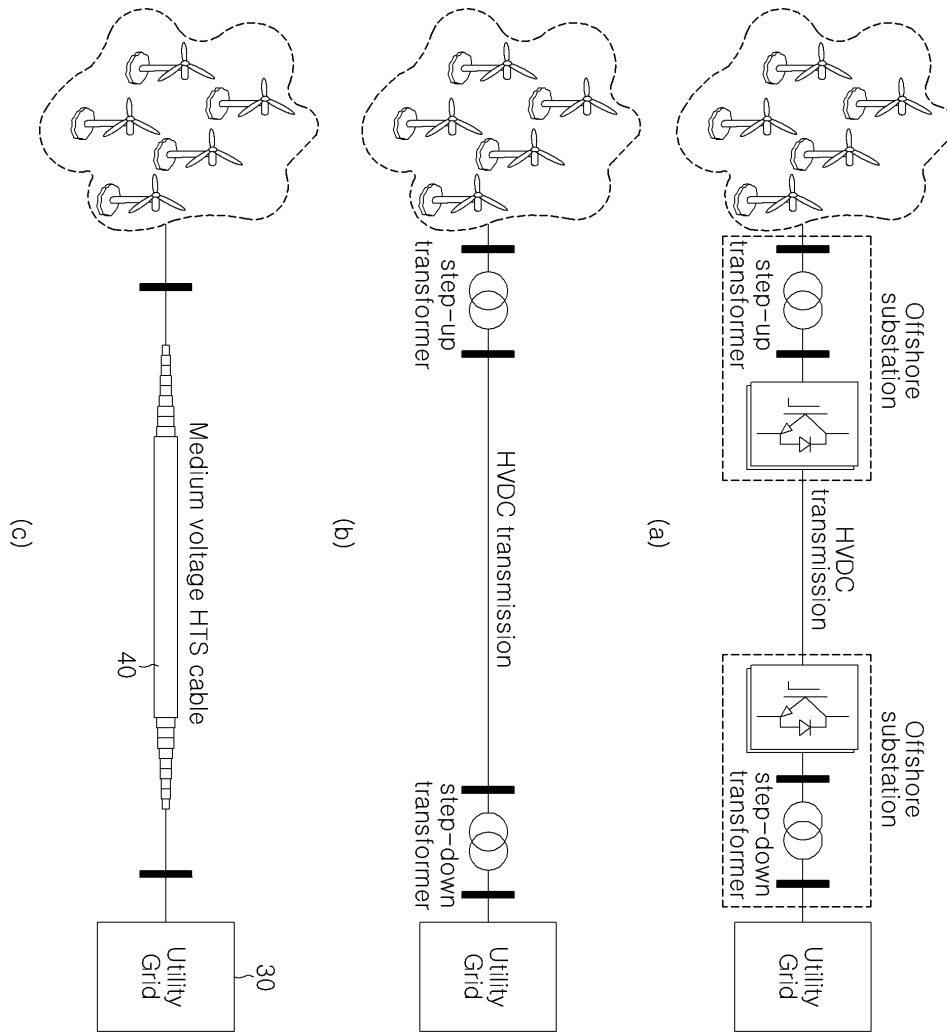
[0168] 이상에서 본 발명의 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

부호의 설명

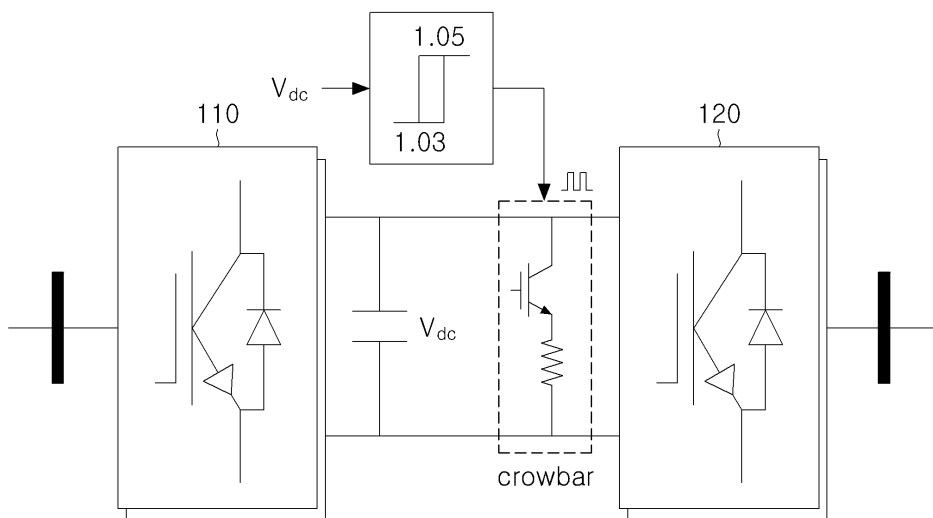
[0169] 10: 플라이휠 조립체
20: PMSG
30: 그리드
40: 초전도케이블
100: 시스템
110: 발전기측 컨버터
111: MSC 전류 제어기
112: LVRT 스위치
113: PI 레귤레이터
114: MPPT 컨버터
120: 계통측 컨버터
121: GSC 전류 제어기
122: DC 링크 전압 컨트롤러
130: LVRT 컨트롤러
131: 고장 조건 판별부
133: OR 게이트
134: NOT 게이트
135: 출력 필터

도면

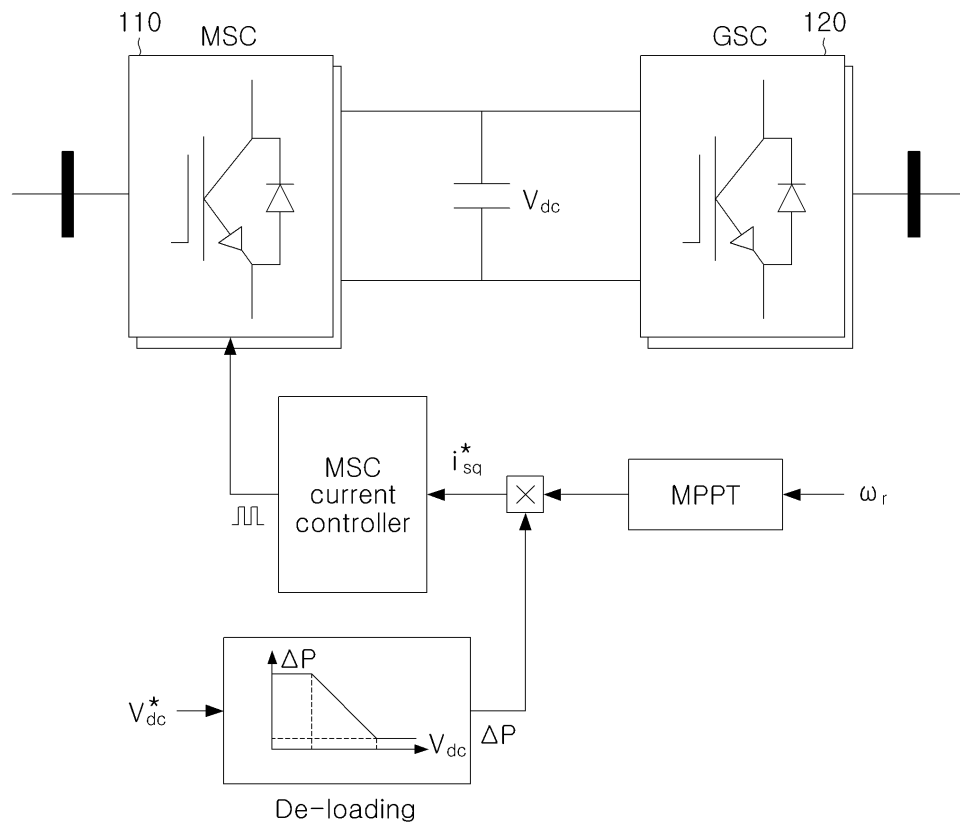
도면1



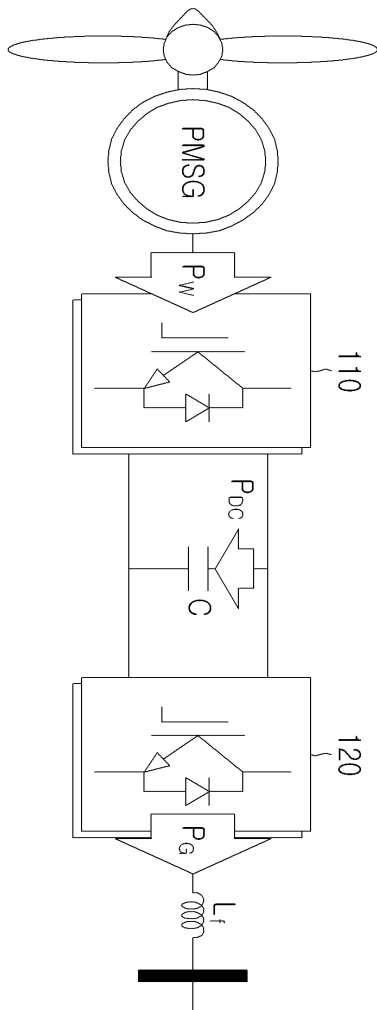
도면2



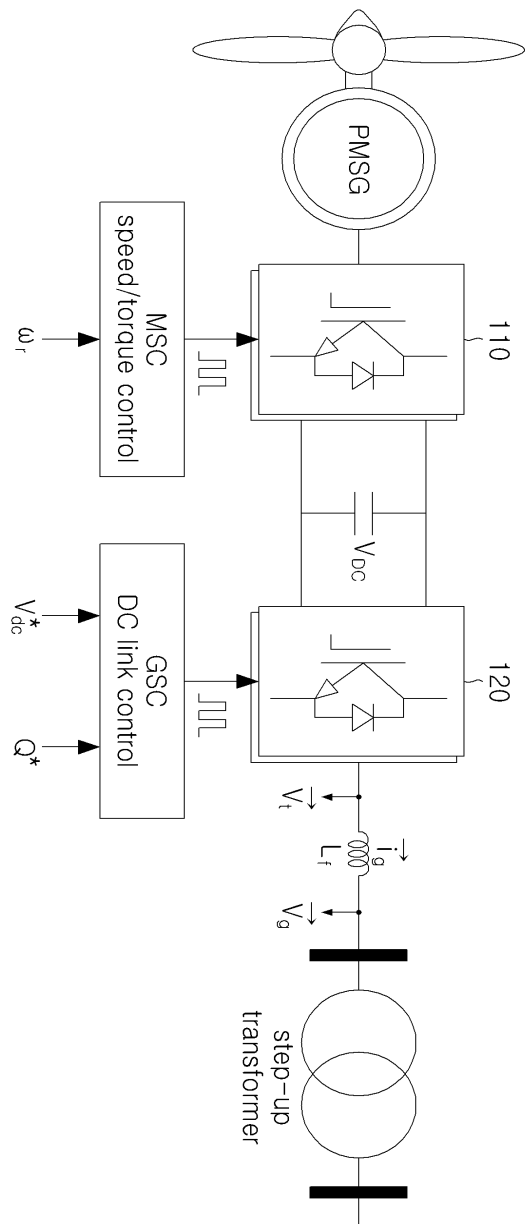
도면3



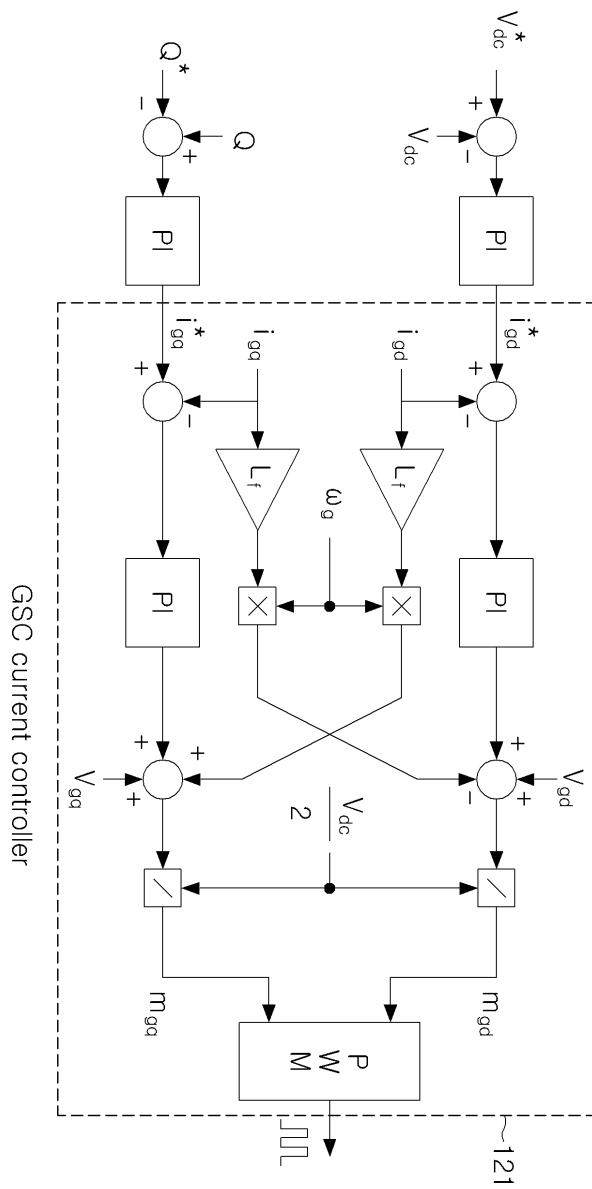
도면4



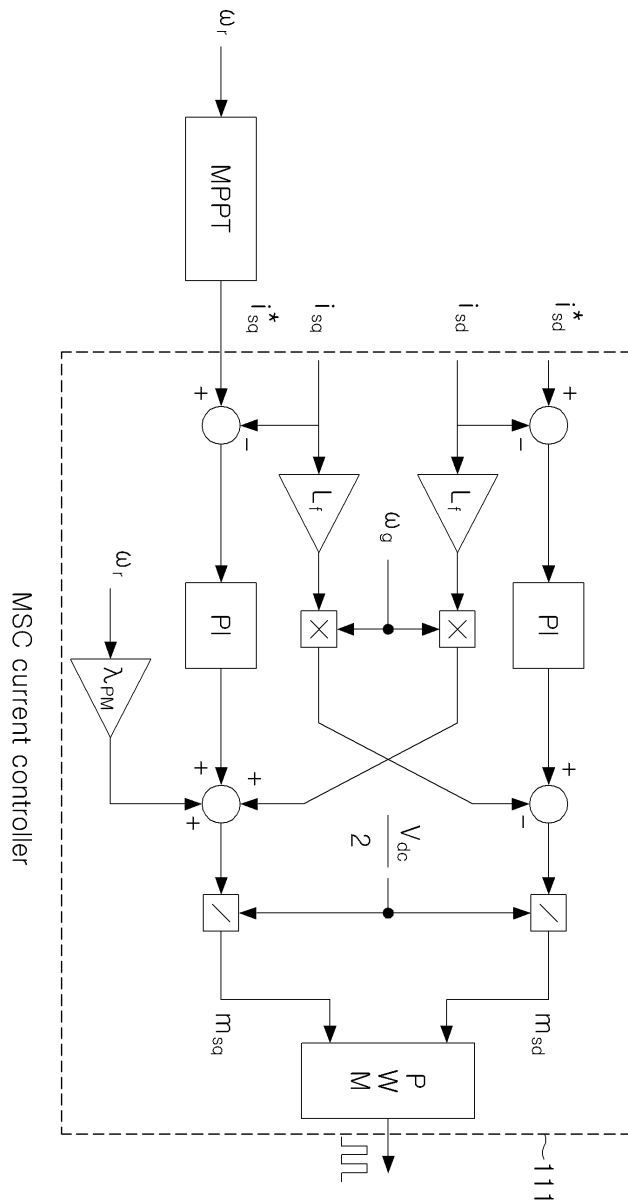
도면5



도면6

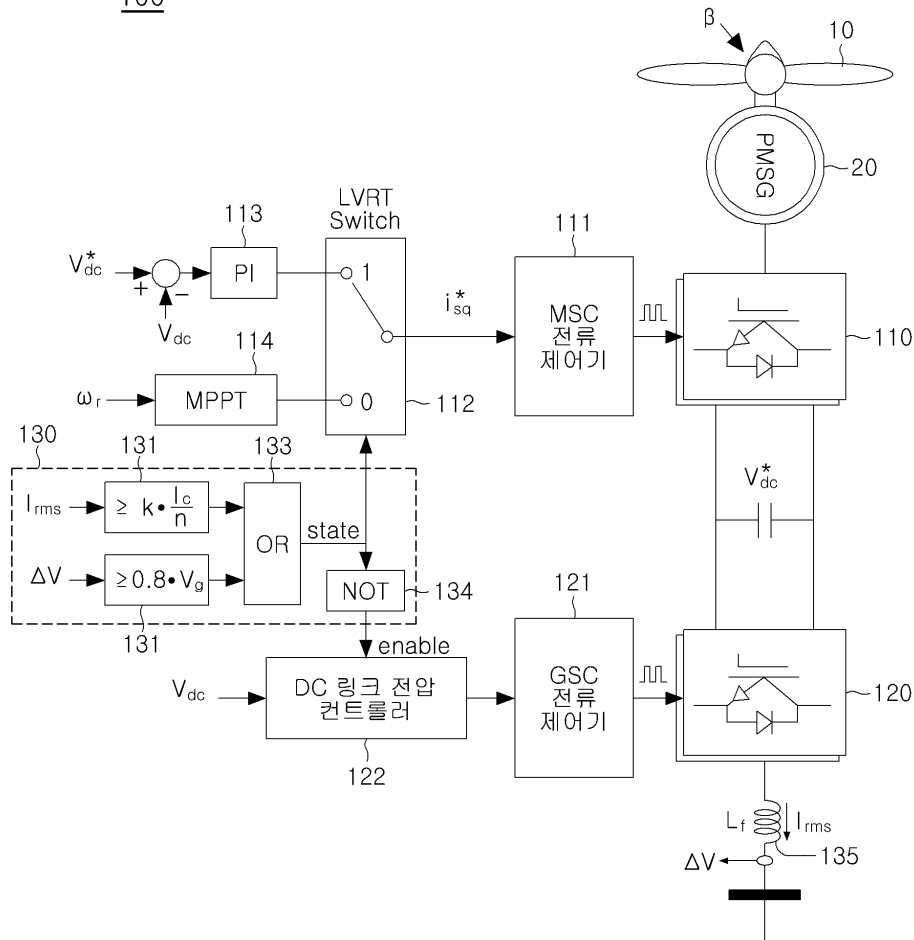


도면7



도면8

100



도면9

