

가변속 DFIM용 전력변환시스템 주요기술분석 및 개발전략

2024. 4. 25

충남대학교

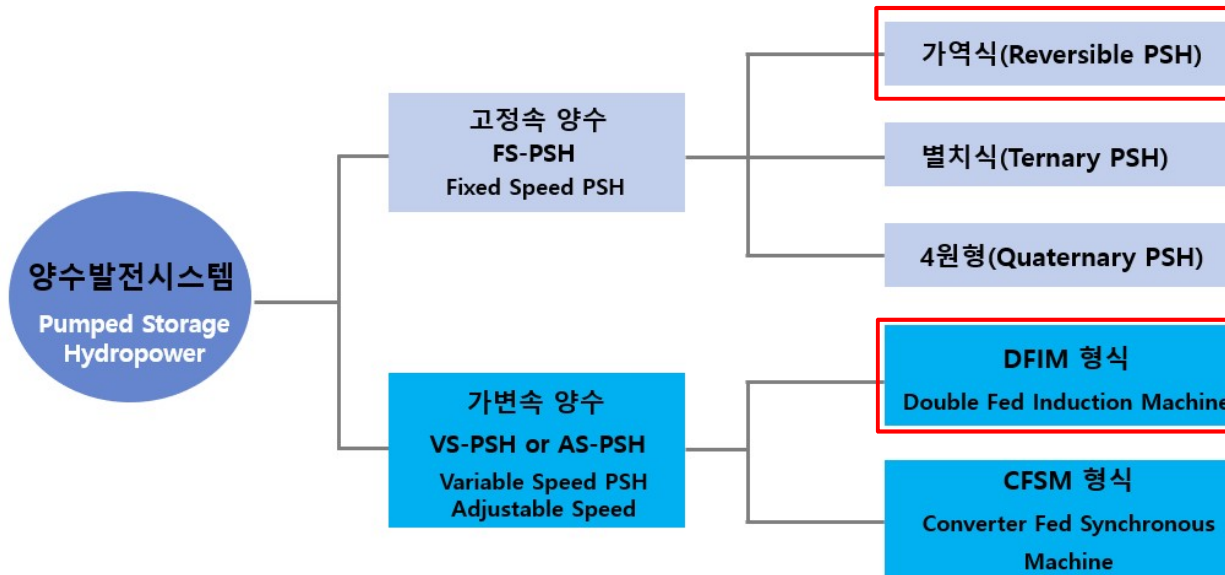
차 한 주



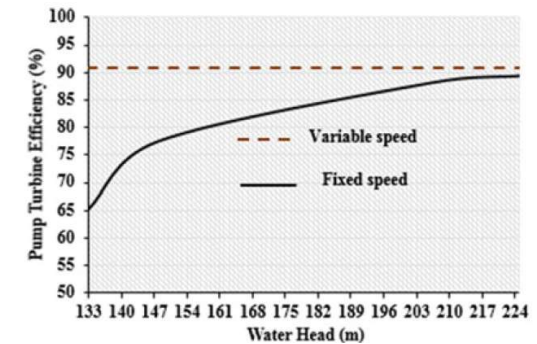
충남대학교
CHUNGNAM NATIONAL UNIVERSITY



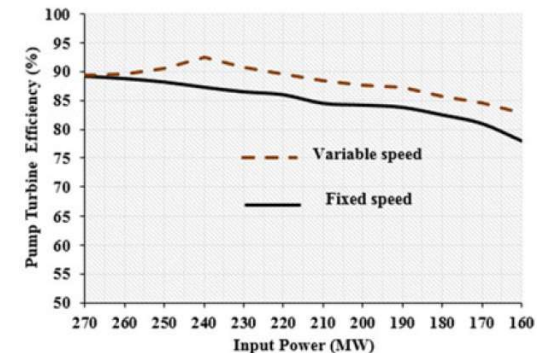
양수발전 시스템 기술 분류



< 양수발전 시스템 분류 >



< 고정 입력 전력(250MW)에서의 효율 >

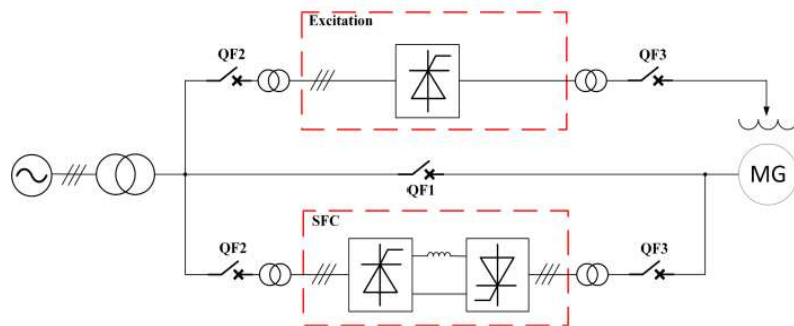


< 고정 양정(200m)에서의 효율 >

- 가변속 양수발전은 회전 속도가 부하와 양정에 대한 최적 속도로 운전하여 전체 시스템 **효율 향상**.
- 가변속 양수발전은 터빈모드와 **펌프모드**에서 **주파수 제어 기능**이 있으며, 터빈 모드- 펌프모드 전환시간이 짧아, **빠른 응답성의 fast DR**로 동작 가능함.

양수발전 시스템의 기술 변화

고정속 시스템(동기기)



컨버터 : **SFC** (Static Frequency Converter)

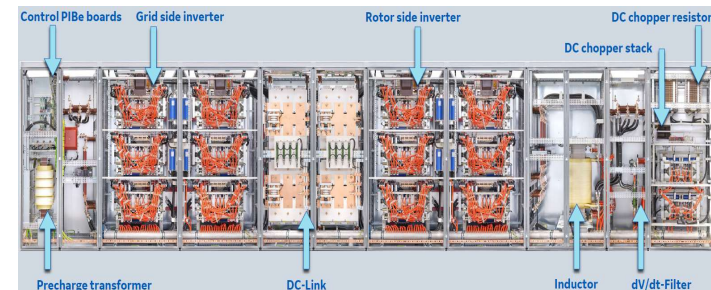
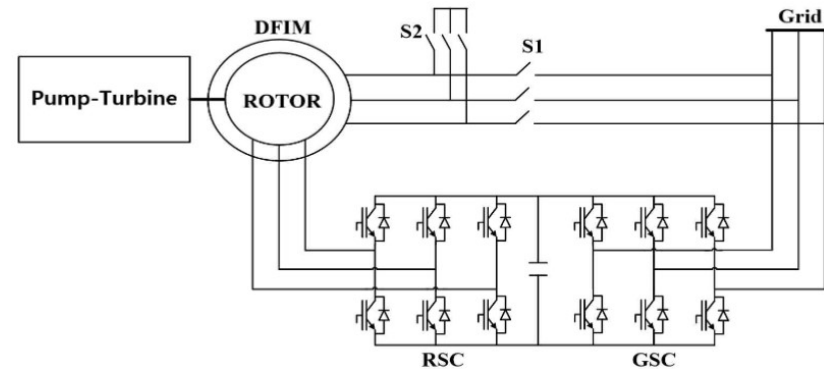
적용 사례: 국내 양수발전소

적용 용도: **펌프 기동/정지용**

적용 기술: **LCI**-Load Commutated Inverter

적용 소자: Low-loss thyristor

가변속 시스템(DFIM)



컨버터 : **Rotor Converter**

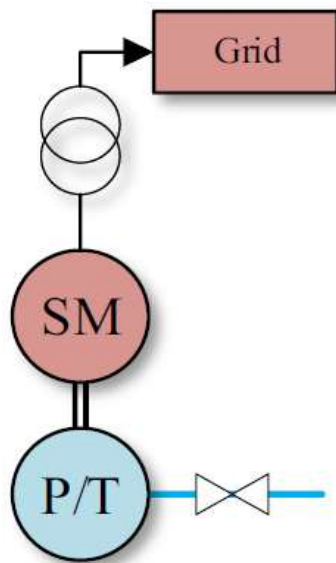
적용 사례: Linthel (스위스, 오스트리아, 독일, 일본)

적용 용도: **터빈/펌프 연속운전, 기동/정지용**

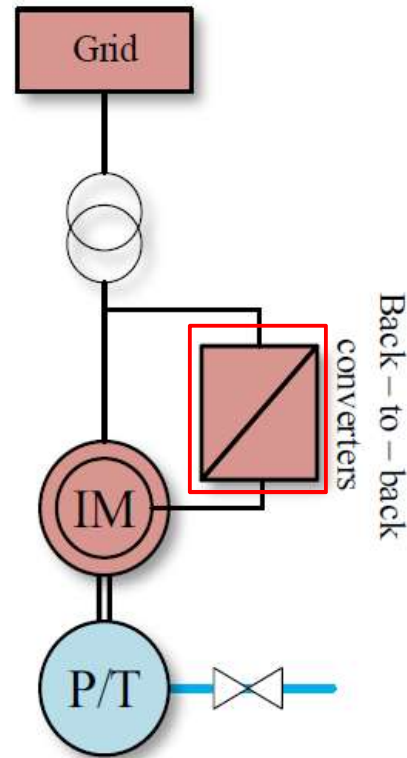
적용 기술: **PWM 3L BTB Converter**, 병렬운전

적용 소자: IEGT, IGCT

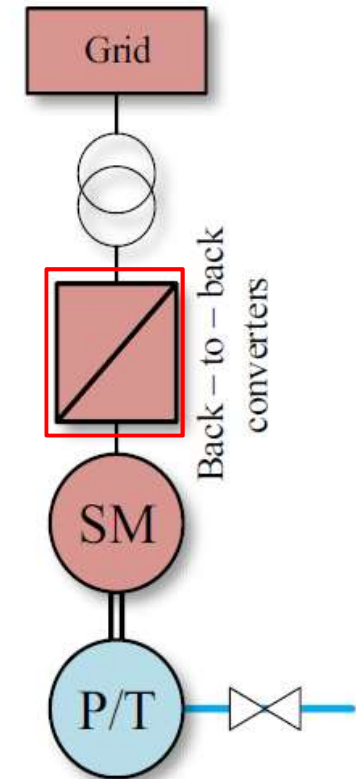
양수발전시스템의 기술 발전



< Fixed Speed PSH >



< Variable Speed PSH-DFIM >



< Variable Speed PSH-CFSM >

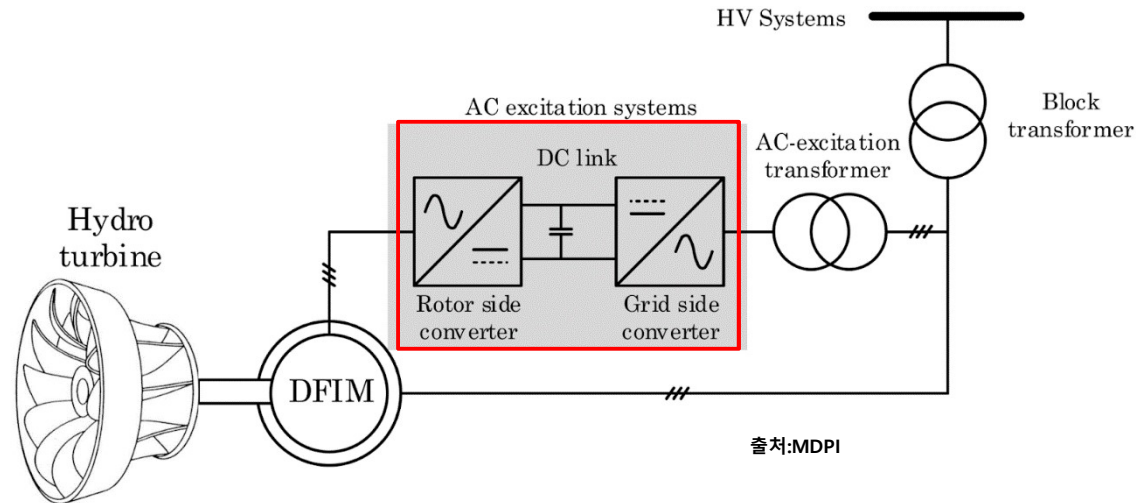
- **DFIM 시스템** : 슬립 전력만 컨버터가 제어하기 때문에 대규모 시스템에 사용 (**100MW이상**)
- **CFSM 시스템** : 전체 발전기 용량과 컨버터 용량이 동일 → 소규모 시스템에 적용 (**100MW이하**)

양수발전의 성능 비교(정속 VS 가변속)

구분	발전모드		양수모드	
	고정속	가변속(DFIM)	고정속	가변속(DFIM)
발전 및 양수 기동	70초	75~85초	160~340초	160~230초
모드 전환	240~420초	240~415초	90~190초	90~190초
출력조정 속도	6%/초	10~20%/0.2초	-	10~20%/0.2초
출력조정 범위	30~100%	20~100%	100%(고정)	60~100%
주파수 조정	가능	가능	불가능	가능
동기 예비력	가능	가능	불가능	가능
부하추종	가능	가능	불가능	가능
무효전력 제공	가능	가능	불가능	가능
발전기 탈락 대응	가능	가능	불가능	가능

[출처] A Review of Technology Innovations for Pumped Storage Hydropower April 2022, ANL-22/08 등

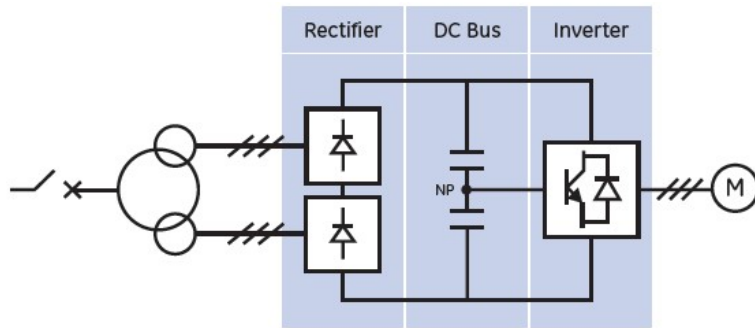
DFIM(Doubly-Fed Induction Machine) 가변속 양수발전 구조



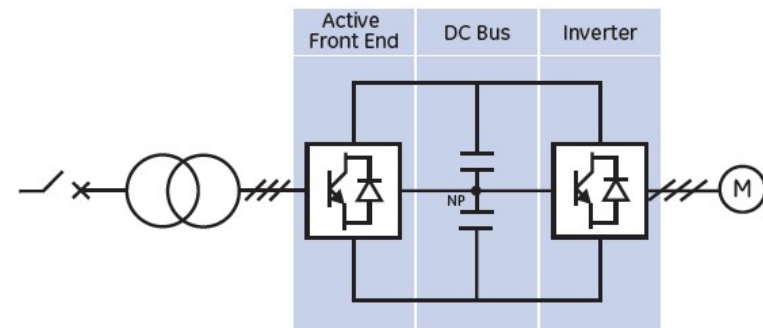
< 가변속 DFIM 시스템 구성 >

- DFIM은 고정자는 계통에, 회전자는 Rotor Converter에 연결되며, Rotor Converter는 RSC(Rotor Side Converter) 와 GSC(Grid Side Converter)로 구성된 **백투백 컨버터** 방식이다.
- DFIM은 회전자와 전력변환시스템사이의 전력 교환을 통해 **슬립 주파수**만 제어하여 **동기 속도의 $\pm 10\%$** 이내에서 속도를 조정할 수 있는데, 이에 따라 회전자에서 고정자로 추가 전력이 전달할 수 있다.
- 회전자 전류의 주파수 조정을 통해 고정자 주파수와 전압은 그대로 유지한 상태로 가변속 운전을 할 수 있다.
- DFIM 방식은 CFPM에 비해 비교적 **작은 용량의 컨버터**를 사용하므로, 대규모 양수발전 시스템에 적합하다.

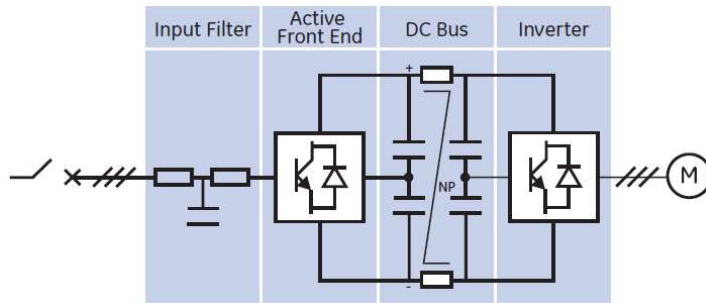
가변속 DFIM 용 컨버터의 구조



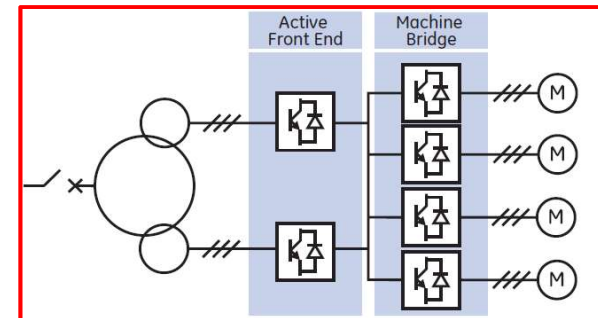
< Diode front-end >



< Active front-end >



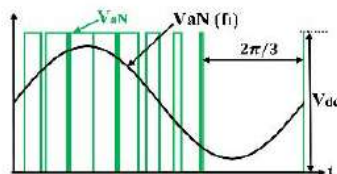
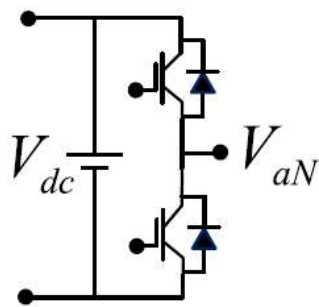
< Transformerless design >



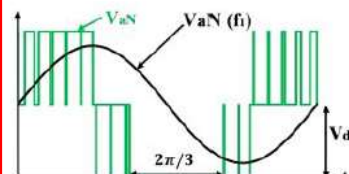
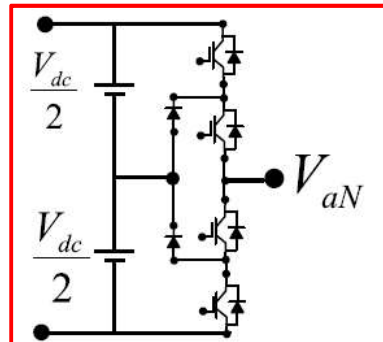
< Common DC bus system >

1. Low harmonics without additional equipment
2. Four quadrant operation for energy savings
3. Transformerless design for compactness
4. Common DC bus system for energy savings
5. High performance process control

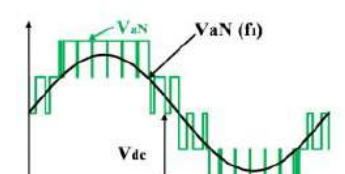
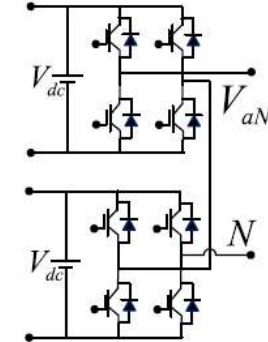
가변속 DFIM 시스템 – 컨버터 토폴로지



< 2L-VSC >



< 3L-VSC >



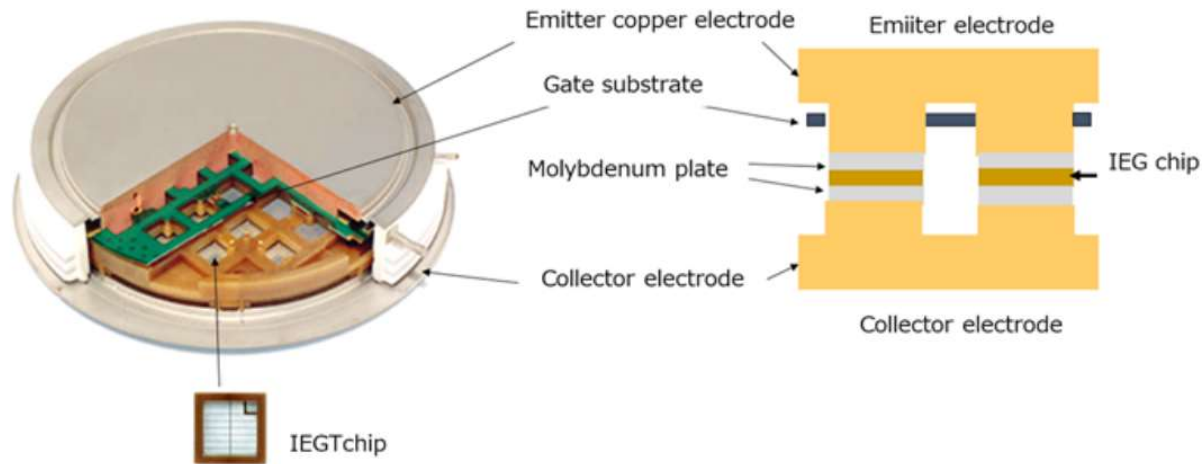
< 5L-CHB VSC >

- 현재 DFIM시스템에는 **백투백 전압원 컨버터 (VSC)**가 주로 사용되며, VSC는 부하 전류 고조파를 크게 줄이면서 유/무효 전력을 분리하여 제어할 수 있다.
- **2L-VSC**: 간단한 제어방식을 가지고 있지만 다중 VSC에 비해 높은 THD, 높은 dv/dt의 단점이 있다. – 포르투갈의 (포르투갈-FradesII에 사용 중)
- **3L-VSC**: 전압 스트레스가 낮아 장치의 고장률이 낮고 2L-VSC에 비해 THD가 낮다. 그러나 추가 클램핑 다이오드가 필요하고 2L-VSC보다 제어 방식이 복잡하다. (스위스-Linthal, 인도 Tehri에 사용 중)

가변속 DFIM 용 컨버터의 전력용반도체(IEGT)

PPI:4.5kV/2.1kA(All IEGT)

Structure of Press Pack IEGT



< Construction of Press Pack IEGT-Injection-Enhanced Gate Transistor>

Manufacturer	Device Type	U_{CE} [V]	U_{dc}^* [V]	I_C [A]
Toshiba	IEGT(Presspack)	4500	2700	2100

- U_{CE} : The variables used in the table are: Maximum collector-emitter voltage of the device at 25°C
- U_{dc}^* : Permanent dc-link voltage
- I_C : Continuous collector current of the device

가변속 DFIM 용 컨버터의 전력용반도체(IGCT)



- High snubberless turn-off rating
- High electromagnetic immunity
- Simple control interface with status feedback
- AC or DC supply voltage
- Option for series connection (contact factory)

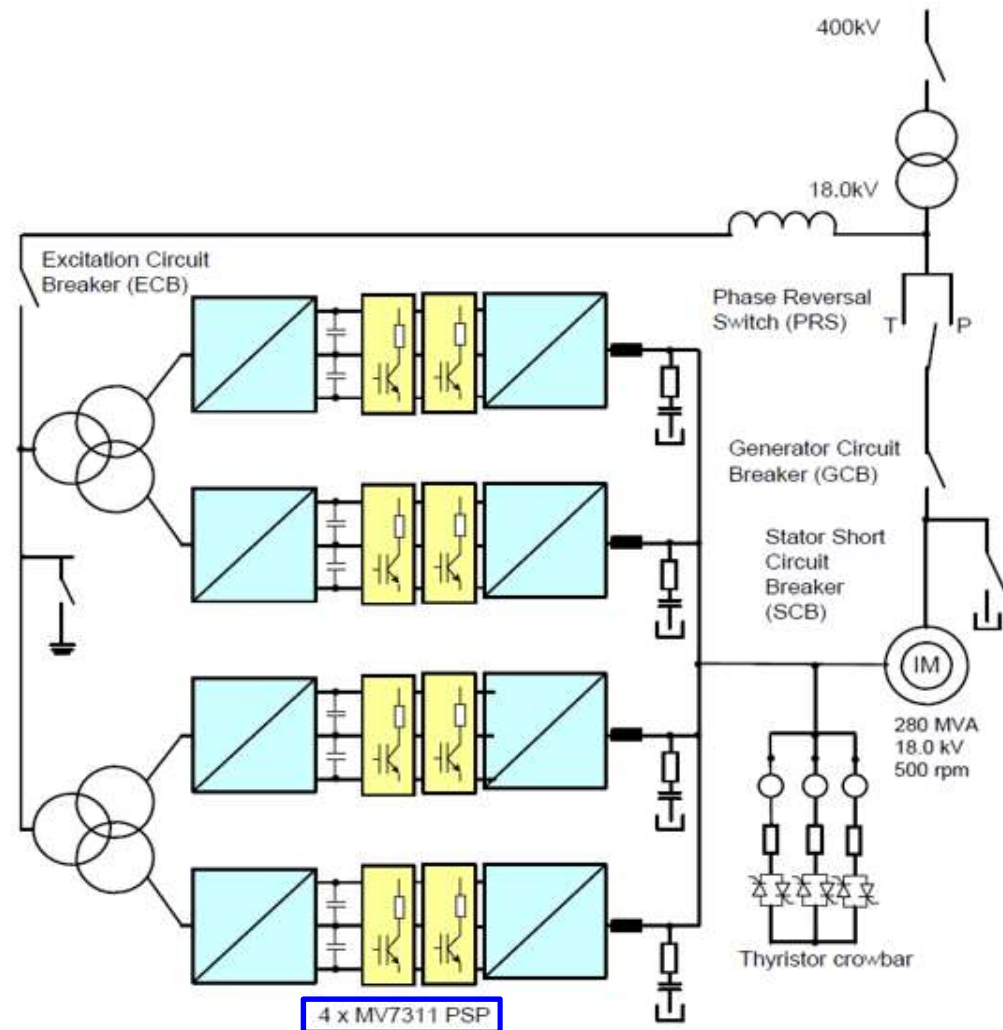
< ABB Commutated Thyristor 5SHY42L6500 IGCT-Integrated Gate-Commutated Thyristor >

Manufacturer	Device Type	U_{CE} [V]	U_{dc}^* [V]	I_C [A]
ABB	IGCT(Presspack)	6500	4000	3800

- U_{CE} : The variables used in the table are: Maximum collector-emitter voltage of the device at 25°C
- U_{dc}^* : Permanent dc-link voltage
- I_C : Continuous collector current of the device

Linthal (Switzerland) AC 여자 시스템 구조

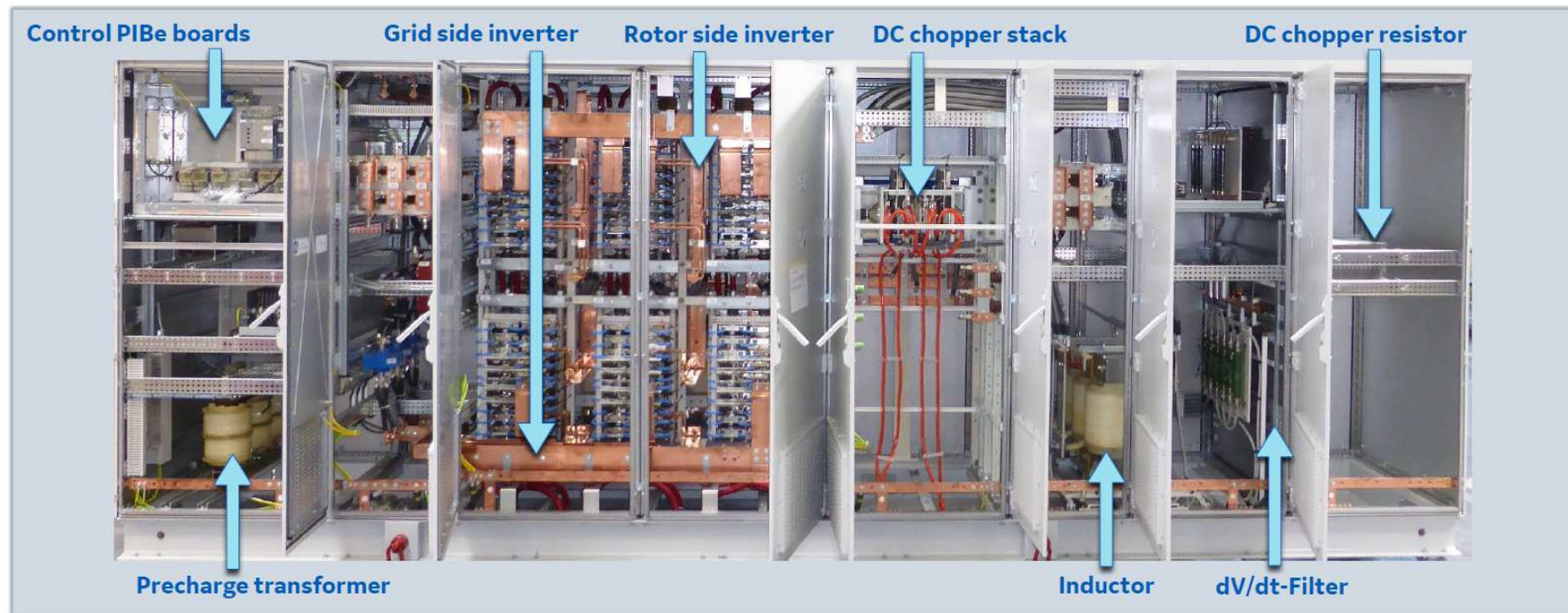
Number of Units	4
Converters Per Unit	4
Apparent Power	44 MVA
AC Excitation Power	28 MW
Speed Range	470–530/min
Rated Excitation Current	8800 A
Rated Excitation Voltage	3.3 kV
Semiconductor	IEGT
Topology	3-level NPC
Starting Mode	Rotor start
Electrical Starting Time	120 s
Swiss Grid Code	Yes
Crowbar Protection	Yes
First Synchronization	Dec. 2015



가변속 DFIM 시스템 – GE사(MV7311) 컨버터

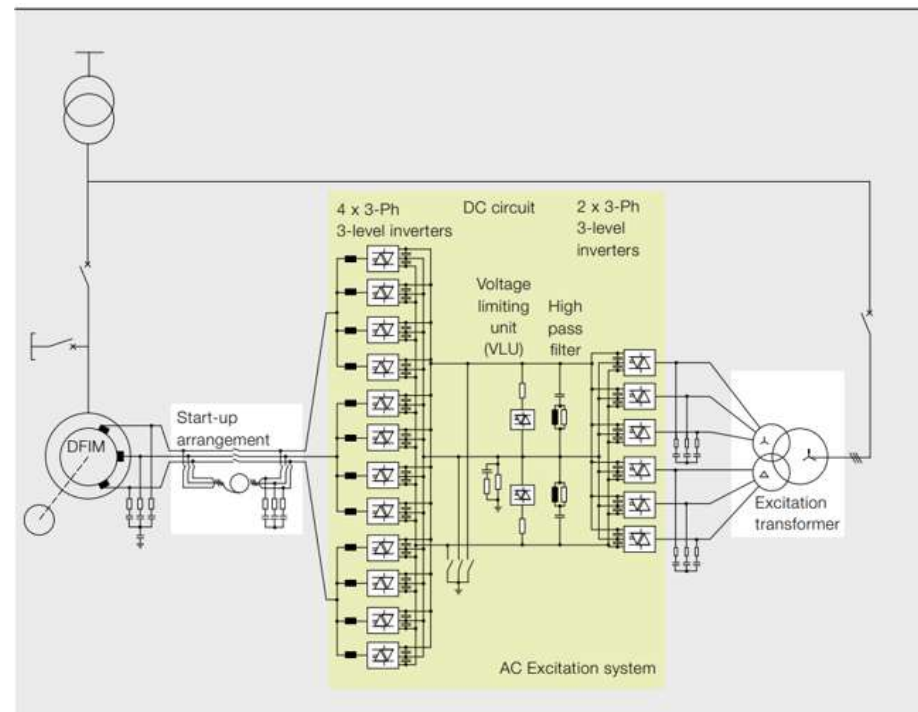
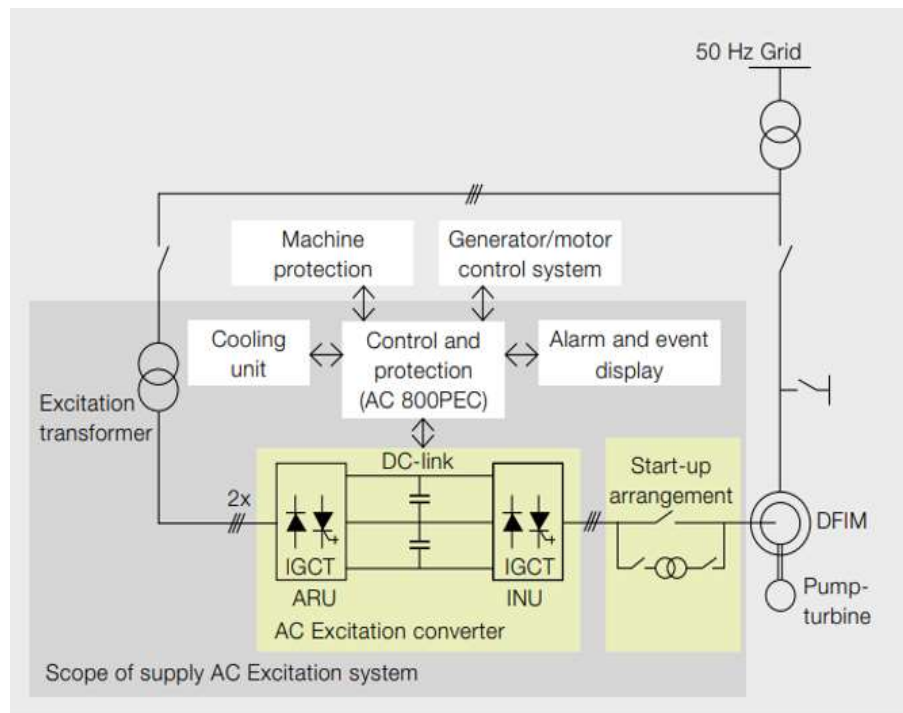
Used in: Linthal (Switzerland) , Nant de Drance (Switzerland) and Tehri (India)

	↓	↓	↓
발전소 출력	4*250MW	6*150MW	4*250WM
컨버터 용량:	28MW	-	25MW
컨버터 전압:	3.3kV	3.3kV	3.3kV
컨버터 소자:	IEGT	IEGT	IEGT
rpm 범위:	470~530rpm	398.6~458.6rpm	206~250rpm



< MV7311 >

Avce (Slovenia) PCS-8000 AC Excitation

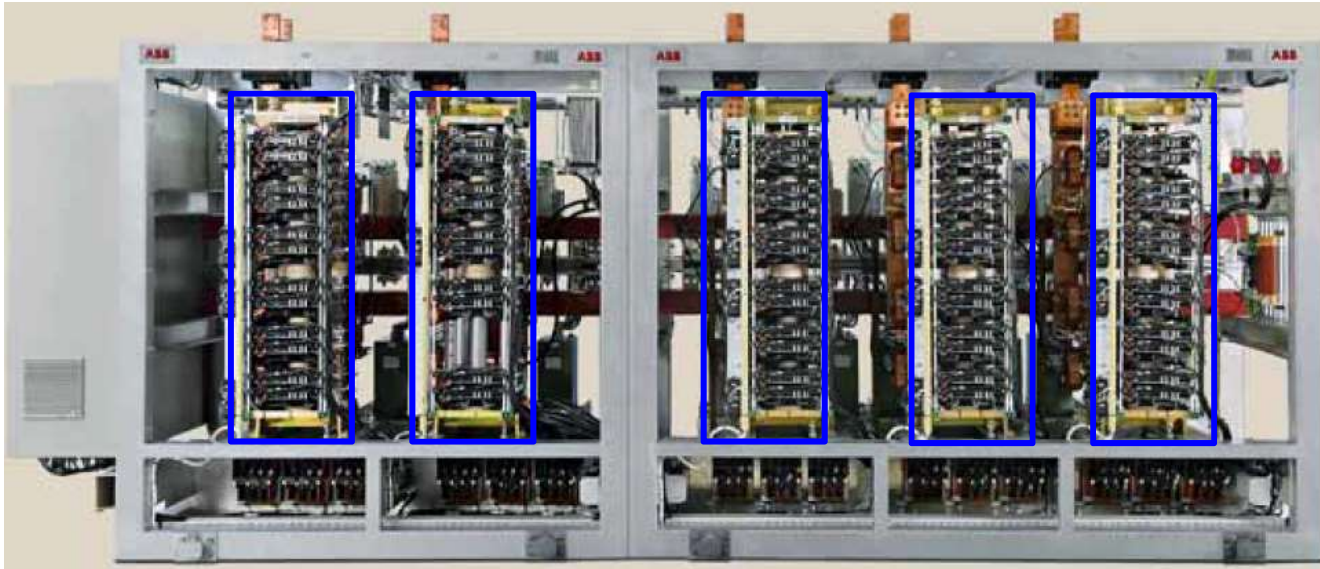


< AVCE Converter Schematic >

- Slovenia의 AVCE PHSP에는 DFIM 구동을 위한 195MVA PCS8000 AC Excitation이 설치되어 있다.
- 3-Level ANPC 구조이며, IGCT로 이루어져 있다. 출력 가능 전압의 범위는 6kV이며, 최대 출력 가능한 파워 범위는 100MVA이다.

가변속 DFIM 시스템 – ABB사(PCS-8000) 컨버터

Used in: Slovenia- Avc̃e of Soške Elektrarne Nova Gorica

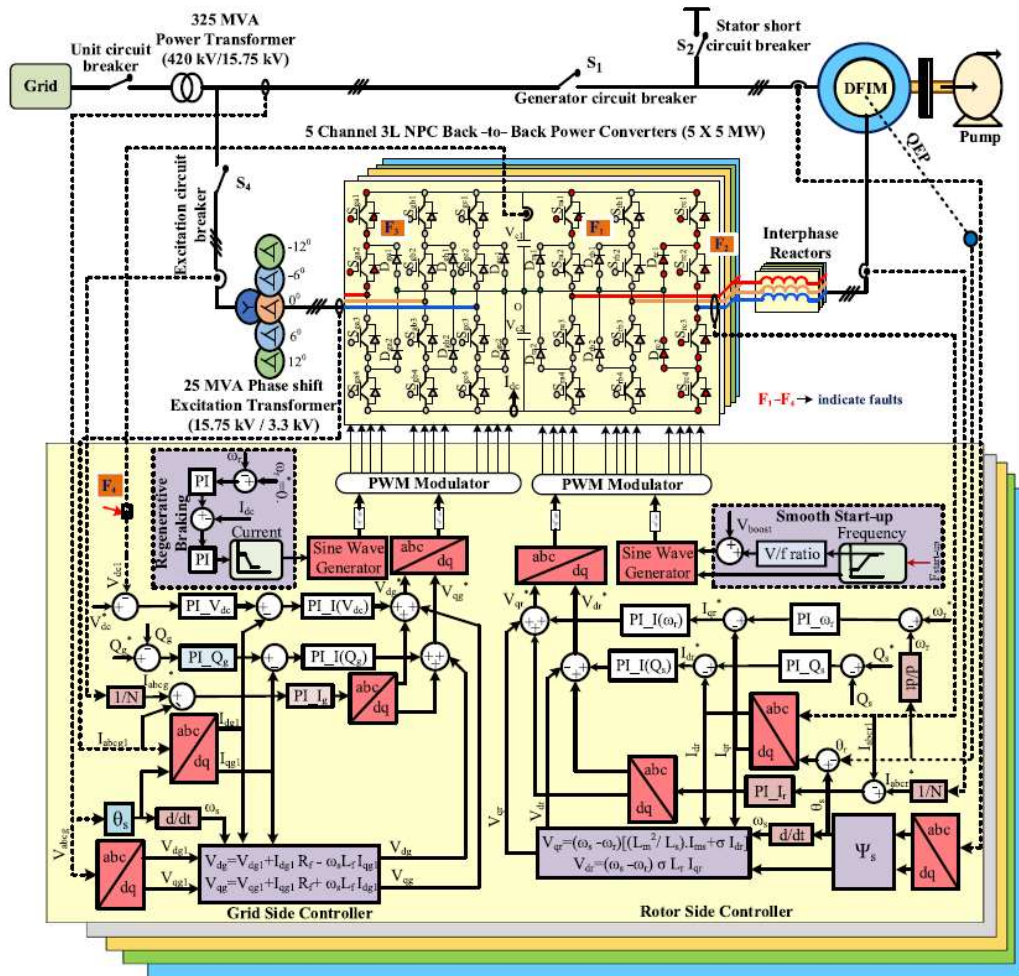


발전소 출력	180MW
컨버터 용량:	11.6MVA
컨버터 전압:	3.6kV
컨버터 소자:	IGCT
rpm 범위:	596~604rpm

< A frequency converter built from five PCS8000 power modules >

- PCS8000 AC Excitation은 3-Level IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor)로 만들어진 DFIM용 구동용 컨버터이다.
- 2개의 3상 Active Rectifier Unit(ARU)과 1개의 3상 Inverter Unit(INU)가 하나의 DC Link로 연결되어 있는 구조이다. INU는 정격 운전을 위한 회전자 전류를 공급하기 위해 병렬로 4개의 Phase Leg를 가진다. IGCT 소자는 GTO의 장점과 IGBT의 장점을 결합하였기 때문에 높은 파워의 컨버터에서 뛰어난 기술이다. GTO와 같이 도통 손실이 작으며 IGBT와 비교할 만큼 빠르다.

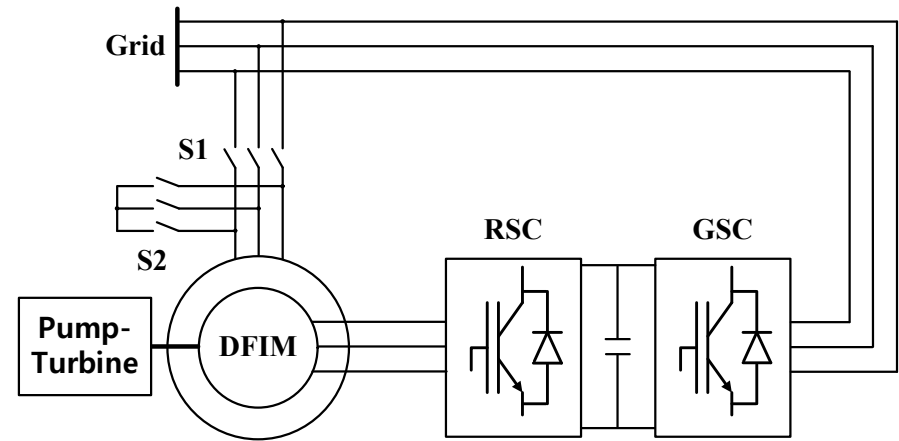
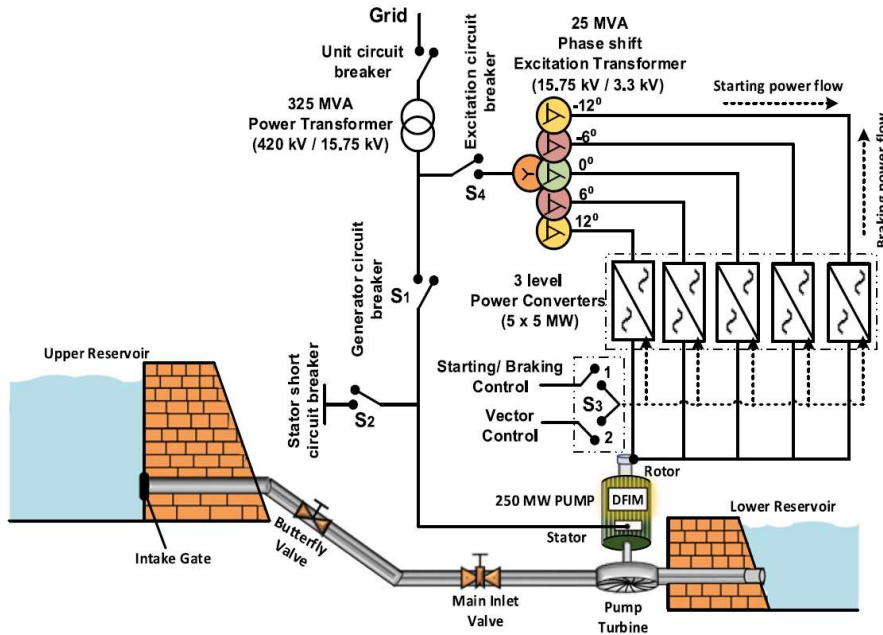
가변속 DFIM 제어 알고리즘과 주요 기술



- 정상작동 중 RSC는 주로 DFIM의 회전자 를 제어하는 역할을하며, GSC는 DC링크 컨버터의 전압을 제어한다.
- RSC에서는 벡터제어를 사용하여, 회전자 속도/유효전력을 제어하여 원하는 속도 로 동작시켜 효율 관리가 가능하다.
- 이때 필요에 따라 무효전력도 제어할 수 있다.
- GSC에서는 RSC의 원활한 동작을 위해 DC-링크 전압을 일정하게 유지한다,
- 필요에 따라 무효전력을 제어하여 계통 에 무효전력 지원을 할 수 있다.

< DFIM 제어 시스템 >

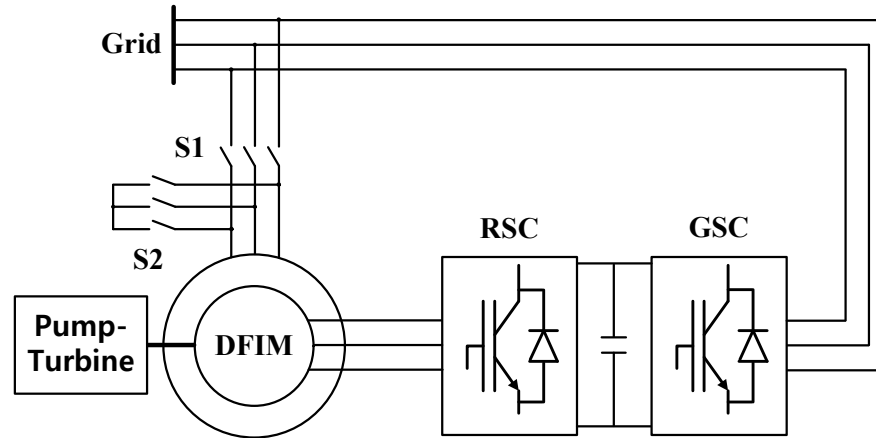
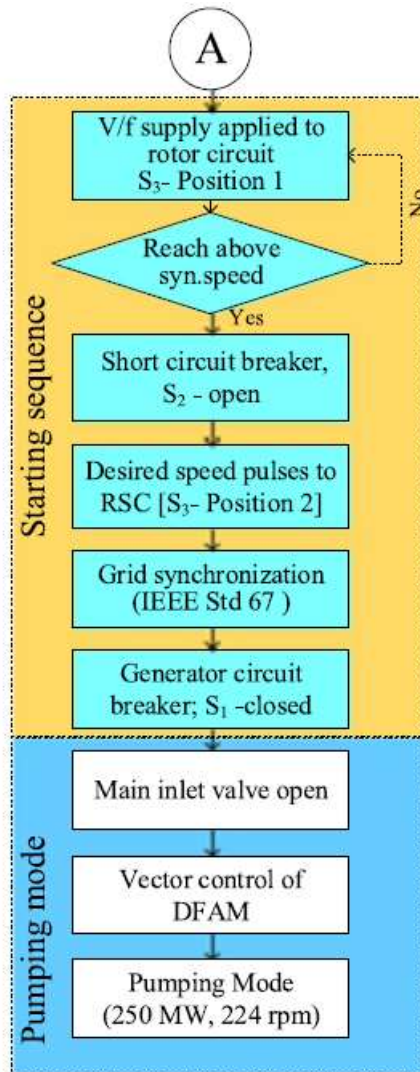
가변속 DFIM 시스템 – 기동



< 인도 Tehri PPSP 250MW 시스템(250MW*4) >

- 2024년 시운전을 예정중인 인도 Tehri PSPP시스템에는 회전자 측 컨버터를 사용하여 기동하는 방식이 포함되어 있으며, 고정자와 회전자에 연결된 스위치를 통해 기동할 수 있다.
- **S1**을 개방하고 **S2**를 단락시키면 DFIM은 회전자 측에서 구동되는 농형 유도기로 동작하며, 회전자측 컨버터를 V/f 로 제어하여 기동할 수 있다.

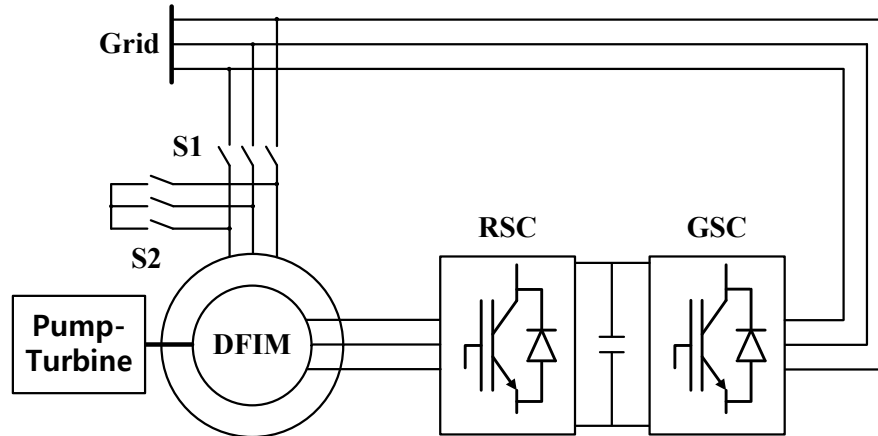
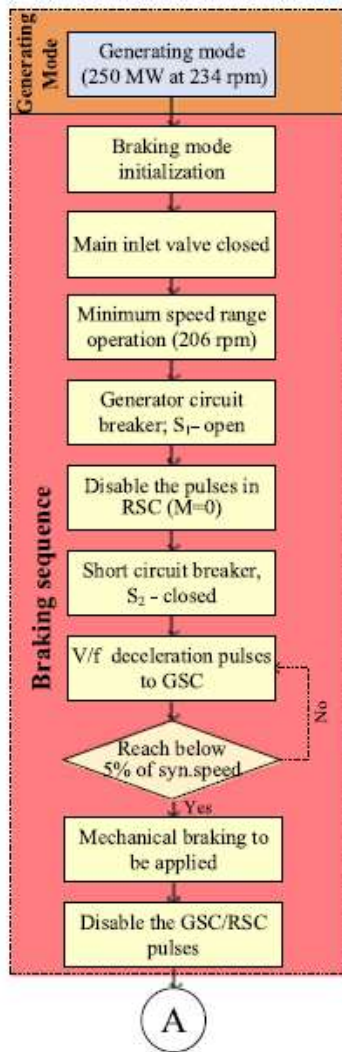
가변속 DFIM 시스템 – 기동 시퀀스



• 기동 절차

1. DFIM 고정자를 단락(차단기 S1개방, S2단락)하고 RSC를 V/f로 제어하여 회전자 측에서 동작하는 농형 유도기로 동작시켜 기동
2. 기계가 목표 속도(동기속도의 103%)까지 도달하면 RSC를 비활성화 하고 고정자 전류를 0으로 감소시킨다.
3. 고정자 전류가 0으로 감소하면 단락되어있는 고정자를 S2를 통해 개방한다.
4. 개방된 상태에서 RSC를 제어하여 고정자 측 전압을 계통 전압과 일치시키고 그리드 코드에 부합하면 S1을 단락시켜 계통과 연결한다.
5. 메인 인렛밸브를 개방하여 펌프모드로 동작(정상 작동)

가변속 DFIM 시스템 – 정지 시퀀스

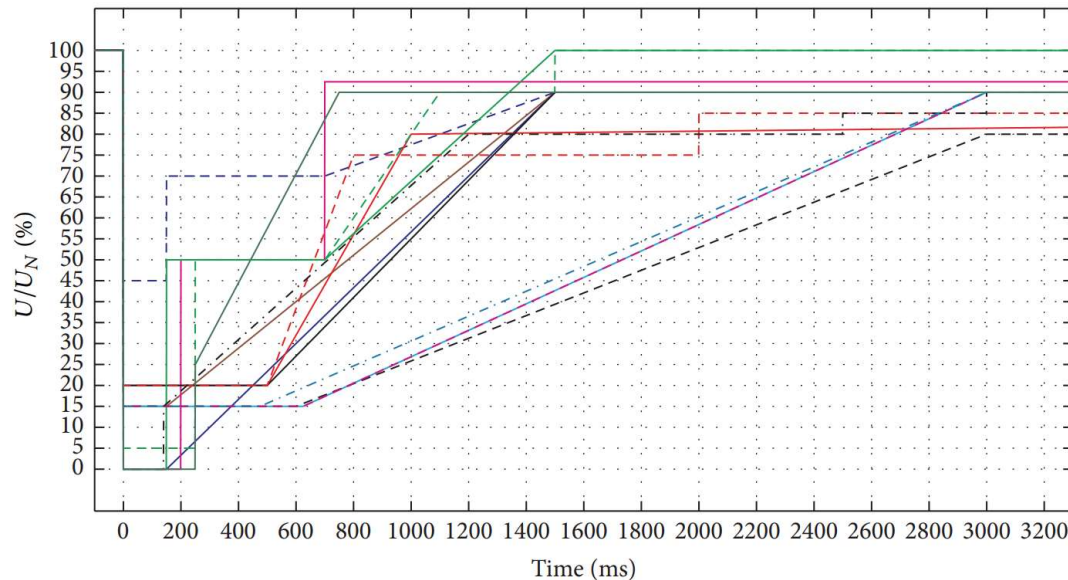


- 기존 고정속 PSPP에서는 동적 제동장치를 사용하여 정지하기 때문에 정지 중 에너지를 낭비하게 된다. 그러나 가변속 DFIM에서는 V/f를 사용하여 회생제동하여 에너지를 RSC로부터 계통으로 전달할 수 있다.
- 정지 절차
 1. 메인 인렛 밸브 잠금
 2. 벡터 제어를 사용하여 회전 속도(=기계속도)를 최소 작동 속도(인도 Tehri PSPP의 영구 -10.73% 동기속도)로 도달
 3. 차단기 S1을 개방하고 RSC 비활성화, 고정자를 단락(S2 단락) V/f전략을 GSC에 적용
 4. 기계가 동기 속도의 5%에 도달하면 기계적 제동이 적용되고 GSC/RSC에서 V/f 펄스가 비활성화된다.

가변속 DFIM 시스템 기술 - 그리드코드

Country/region	Australia	China	Europe	Great Britain	Japan	North America	Singapore
Nominal frequency	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50/60 Hz	60 Hz	50 Hz
Normal operating frequency band	Interconnected system: ± 0.15 Hz Islanded system: ± 0.5 Hz	System ≥ 3 GW: ± 0.2 Hz System < 3 GW: ± 0.5 Hz	± 0.2 Hz	± 0.5 Hz Target frequency band: ± 0.05 Hz	± 0.2 Hz or ± 0.3 Hz	Targeted frequency band: Eastern Interconnection: ± 0.018 Hz Western Interconnection: ± 0.0228 Hz Texas Interconnection: ± 0.030 Hz Quebec Interconnection: ± 0.021 Hz	± 0.2 Hz
Operational frequency tolerance band	49–51 Hz Extreme frequency tolerance band: 47–52 Hz	49–51 Hz	49.2–50.8 Hz	49–51 Hz Under-frequency load shedding: 48.8 Hz	—	Under-frequency load shedding: Eastern Interconnection: 59.5 Hz Western Interconnection: 59.5 Hz Texas Interconnection: 59.3 Hz Quebec Interconnection: 58.5 Hz	Under-frequency load shedding: 49.7 Hz

< 여러 국가의
그리드 코드 >

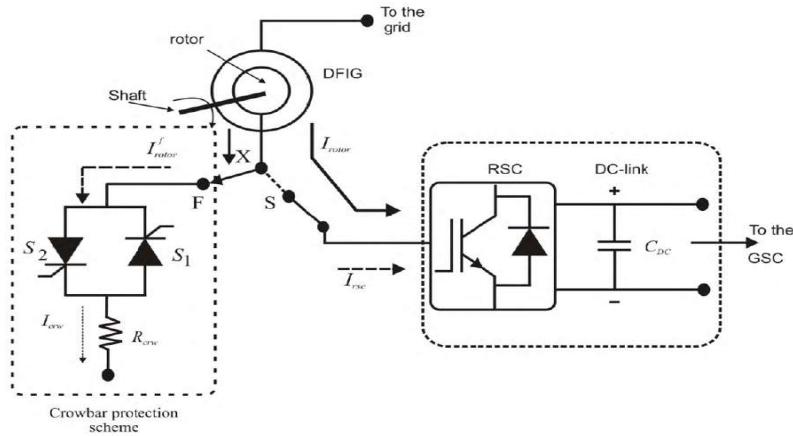


< 국가별 LVRT 요구사항 >

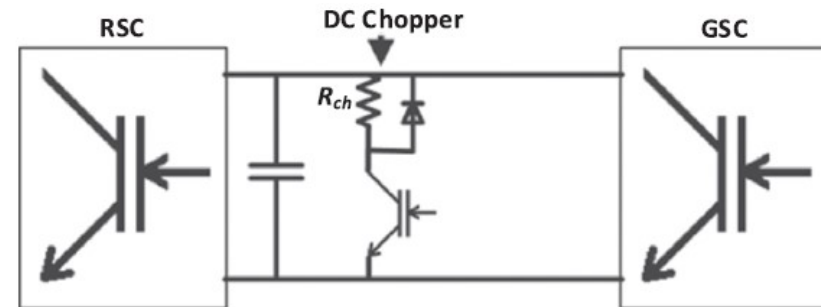
- Germany
- Germany/Greece STI
- Greece
- Spain
- Belgium
- Denmark
- France 400 kV
- France 63–225 kV
- Ireland/Romania
- Italy
- Poland
- Cyprus
- UK
- Turkey
- Finland, Sweden

전압 사고 발생시 전압을 일정하게 유지하기 위해 LVRT/HVRT가 요구되며, 양수발전 시스템과 같은 발전소에서는 전력 공급을 중단하지 않고 다양한 계통 오류를 극복하는것이 중요하다.

가변속 DFIM Converter LVRT – 보호장치



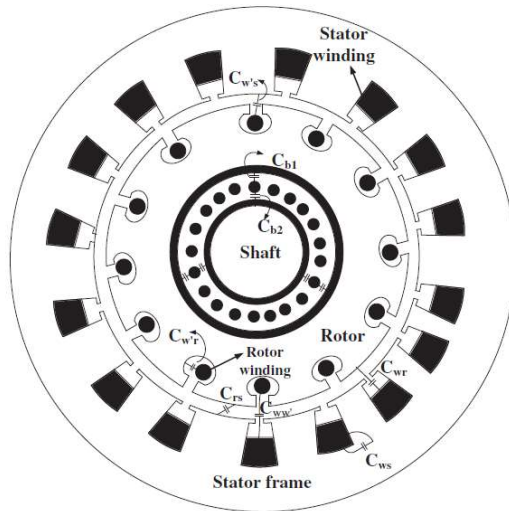
< 회전자에 연결된 crowbar >



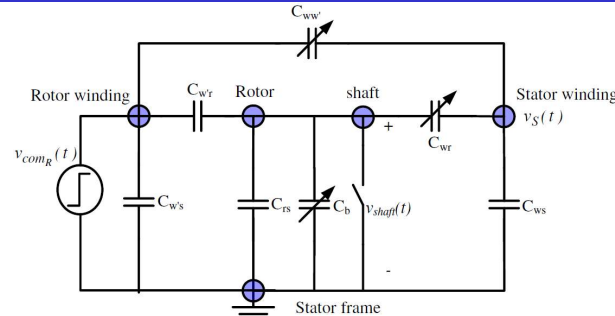
< DC링크에 연결된 DC chopper >

- LVRT발생 시 DFIM을 보호하기 위한 장치가 필요하다.
- Crowbar 시스템은 회전자에 연결되어 전압 강하동안 회전자 측 컨버터를 보호하는 역할을 한다. 전압 강하에 의해 유도되는 높은 과도 전류를 바이패스하여 DC링크의 과전압을 방지한다.
- 회전자 전류가 최대 전류를 초과하게 되면 스위치가 동작하여 크로우바를 활성화 할 수 있으며, 사이리스터 및 IGBT를 사용하여 크로우바를 on/off할 수 있다.
- DC 쇼퍼는 DC링크의 추가적인 보호장치로 커패시터와 병렬로 연결하여 전압이 제한을 초과하는경우 스위치를 닫아 DC링크와 컨버터를 분리하는 역할을 한다.

가변속 DFIM Converter 기술 – shaft voltage



< DFIM 구조에 따른 커패시턴스 >



< 샤프트 전압의 용량성 모델 >

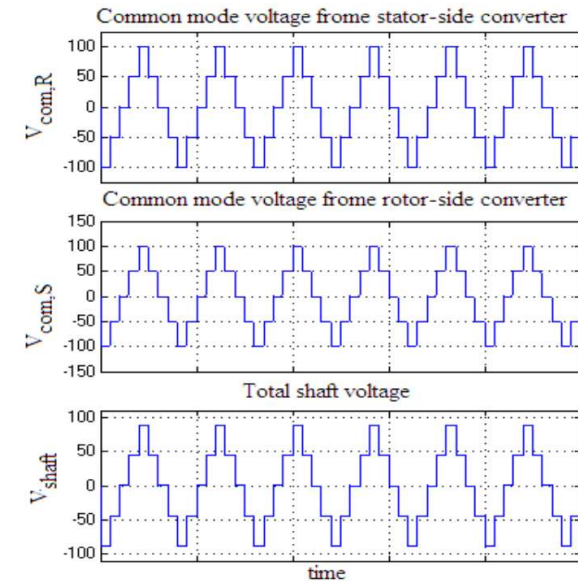
$$v_{comR}(t) = v_{n'o}(t) = \frac{v_{ao}(t) + v_{bo}(t) + v_{co}(t)}{3}$$

V_{abc0} : RSC의 레그 전압

< RSC에 의해 발생된 CMV >

$$v_{shaft}(t) \approx \frac{C_{wr}}{(C_{wr} + C_{rs} + C_b + C_{wr})} \times v_{comR}(t)$$

< 샤프트 전압 >

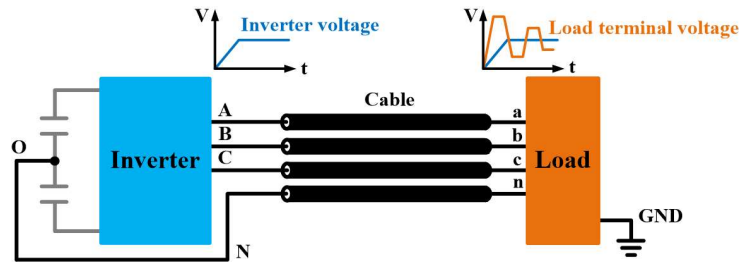


< CMV에 따른 샤프트 전압 >

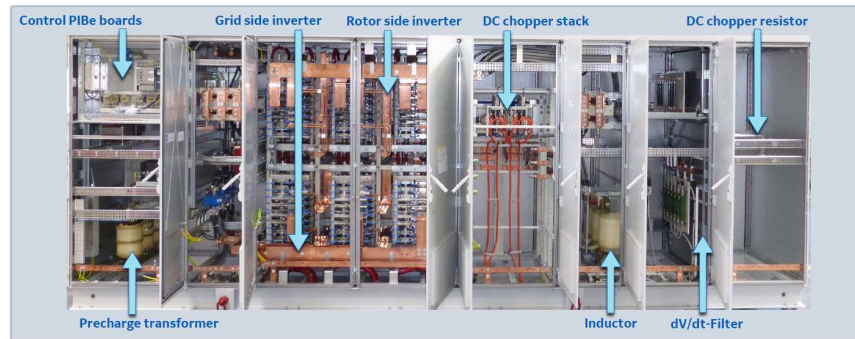
(C_{wr} :5nF, C_{ws} :0.6nF, C_{wr} :0.3nF, C_b :0.1nF)

- DFIM에는 권선 및 프레임에 의해 커패시턴스가 만들어진다.
- 고정자 권선과 회전자(C_{wr}), 고정자 권선과 고정자 프레임(C_{ws}), 회전자와 고정자 프레임(C_{rs}), 고정자 권선과 회전자 권선($C_{ww'}$), 회전자 권선과 회전자($C_{wr'}$) 회전자 권선과 고정자 프레임($C_{ws'}$), 볼베어링 및 외부 및 내부 레이스(C_{b1} , C_{b2})
- GSC는 DC링크로 인해 DFIM과 분리되어 영향이 없으나 DFIM의 회전자에 연결된 RSC의 전압은 프레임 및 커패시턴스에 흘러 샤프트 전압을 발생하게 된다.

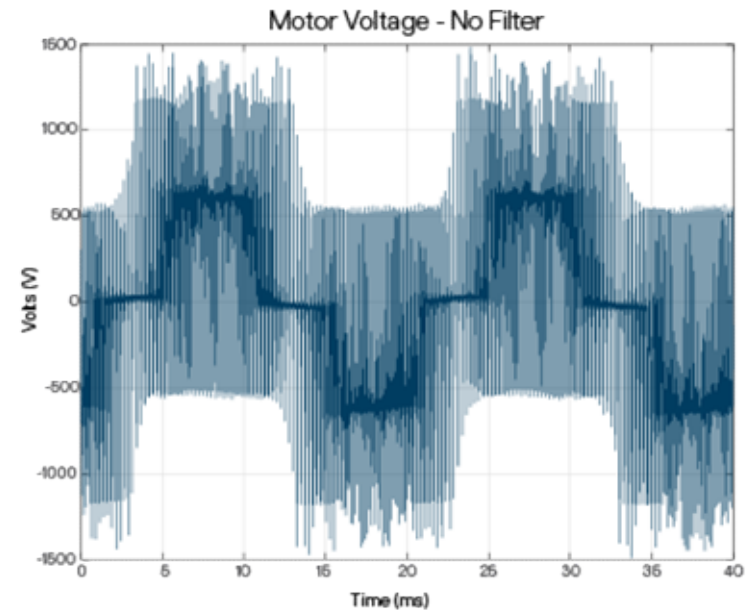
가변속 DFIM Converter 기술 – dv/dt 필터



< 빠른 전압 상승시간으로 인한 과전압 발생 >



< dv/dt필터가 포함된 MV7311컨버터(GE) >



< dv/dt 필터가 없는 경우 단자 전압-DC-link voltage 750V >

- 최근 전력전자 장치에서는 WBG소자의 사용으로 파워 인버터 성능이 개선되어 전력 품질과 효율을 모두 향상시킬 수 있다.
- 그러나, 빠른 전압 상승 시간으로 인해 부하의 특성 임피던스와 전원측 임피던스 불일치가 발생하여, 높은 dv/dt가 발생하고 부하 단자에서 과전압이 발생한다.
- 전원측에 RLC필터를 사용한 수동필터를 설치하여 전압 상승 시간을 줄여 이를 통해 발생하는 과전압을 줄일 수 있다.

가변속 DFIM Converter 주요기술 및 개발

❖ 주요 기술 및 개발

1. 3.3kV, 30MW 용량의 Rotor Converter 제어, 해석, 설계, 제작, 시험, 설치, 시운전, 유지/보수 기술 및 관련 인력 필요
2. 대용량 시스템에서는 스위칭 손실을 저감하기 위해 낮은 스위칭 주파수로 운전하지만 전류의 왜곡 및 위상 변이로 인해 발전기 및 AC 계통 연계 시 전자기 간섭 및 **고조파 문제** → 낮은 스위칭 영향을 줄일 수 있는 PWM 방법, 병렬운전 및 고조파 필터 필요
3. 여러 국가에서 **그리드 코드**를 명시하고 있으며 **LVRT 상황** 발생 시 정해진 시간동안 운전할 수 있는 기술 필요 → 고정자가 계통에 연결되어 있는 DFIM의 구조적 특성상 회전자 측 컨버터 및 DC링크에 과전압이 발생하며, 이를 보호할 수 있는 충분한 보호협조 필요
4. VSC의 사용에 따라 CMV로 인한 **샤프트 전압**이 발생하고 샤프트 전압이 전동기의 기생 커패시턴스로 흐르면, 장비 소손 및 손실 증가 → 스위칭 기법 또는 CMV를 줄일 수 있는 필터가 필요
5. 가변속 DFIM을 기동/정지/가변속 운전 방법 및 제어 방식에 관한 연구가 필요
6. **국산화 개발전략** 및 **국내 인력 양성** 필요