

계통 저전압에 대한 PMSG-Type 풍력터빈의 LVRT 기능에 대한 연구

*강 신일¹⁾, 이 현영²⁾, 권 오정³⁾, 오 상근⁴⁾, 김 수철⁵⁾, 안 종수⁶⁾

Study on LVRT Capability of PMSG-Type Wind Turbine under Low Voltage of the Grid

*Shinil Kang, Hyunyoung Lee, Ohjung Kwon, Sangkeun Oh, Socheol Kim, Jongsoo Ahn

Key words : 저전압, LVRT, 풍력터빈, 유·무효전력, active crowbar, LVRT용 시험장치

Abstract : 현재 세계적으로 풍력터빈의 설치 용량이 점차 증가함에 따라 계통에 연계되는 에너지양 또한 급격하게 증가하였다. 풍력터빈의 크기 및 수가 적었던 예전에는 전형적인 분산형 전원으로써 계통에 소규모 외란이 발생하였을 경우, 풍력터빈은 운전이 정지되었으며 그로 인해 계통에 미치는 영향은 거의 무시될 수 있었다. 하지만 최근에는 계통에 영향을 줄 만큼 풍력발전단지가 증가함에 따라 계통 외란에 대해서 운전을 정지하지 않고 계통에 협조하는 특별한 형태로 그 역할이 변경되고 있다. 그래서 이미 많은 나라에서는 그 나라에 맞는 계통연계규정(Grid Code)을 만들어 풍력터빈들이 계통에 미치는 영향에 대해 재평가가 이루어지고 있으며 이제는 짧은 순간의 계통 외란에서도 풍력터빈은 지속적인 운전을 해야 하는 LVRT 기능을 법제화하고 있는 추세이다.

Subscript

LVRT : Low voltage ride through
FRT : Fault ride through
TSO : Transmission system operator
FERC : Federal Energy Regulatory Commission
WECC :Western Electricity Coordination Council

수로 회복할 수 있는 능력을 보유하고 있지 못하며 이로 인해 오히려 계통의 외란을 증폭시키는 역할을 할 수 있다. 이러한 단점은 전력계통의 안정도에 심각한 문제를 초래하게 되며 이로 인해 전력을 사용하고 있는 수용가 측에 정전과 같은 사태를 일으킬 수 있다. 따라서 전력계통의 안정도를 해치지 않고 대규모 풍력발전기를 운용하기 위해서는 계통사고 시 풍력터빈이 연계 운전을 계속하도록 할 필요가 있다. 이에 따라 계통운영자(TSO)들은 계통시스템 운영의 안정

1. 서론

최근 전 세계적으로 대단위의 계통연계 풍력발전 단지가 설치되고 있는 상황에서 풍력터빈의 안정성과 지속성은 전력을 전달받는 전력계통(power grid)의 특성에 큰 영향을 줄 만큼 중요해졌다. 이것은 외적인 극한 상황에서도 풍력터빈이 계통과 연계되어 지속적인 발전을 수행할 수 있어야 함을 의미하는 것으로 풍력터빈의 용량이 증가함에 따라 에너지에서 차지하는 비중이 커지면서 전력계통과의 상호작용도 점차 그 중요성이 증가하고 있다. 특히나 풍력발전단지에서 사용되는 대부분의 발전기는 비동기식 이어서 계통의 순간 저전압과 같은 사고 시에 풍력터빈들이 동시 다발적으로 운전이 정지된다면 발전기의 회전자 속도를 줄이기 위해 상당량의 무효전력을 소모하게 되므로 사고 직후에는 계통의 전압과 주파

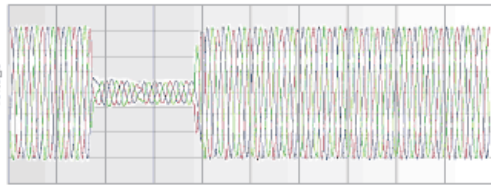
-
- 1) (주)플라스포
E-mail : sikang@plaspo.co.kr
Tel : (031)909-8075 Fax : (031)909-8079
 - 2) (주)플라스포
E-mail : lhy@plaspo.co.kr
Tel : (031)909-8075 Fax : (031)909-8079
 - 3) (주)플라스포
E-mail : flap45@plaspo.co.kr
Tel : (031)909-8077 Fax : (031)909-8079
 - 4) (주)플라스포
E-mail : sangkeun.oh@plaspo.co.kr
Tel : (031)909-8075 Fax : (031)909-8079
 - 5) (주)플라스포
E-mail : sckim@plaspo.co.kr
Tel : (031)909-8075 Fax : (031)909-8079
 - 6) (주)플라스포
E-mail : powerajs@plaspo.co.kr
Tel : (031)909-8075 Fax : (031)909-8079

성을 확보하기 위해 풍력발전시스템에서 필요한 연계조건 code로서 (1) LVRT (or FRT) 능력과 (2)유·무효전력 공급 능력 등을 요구하고 있다.

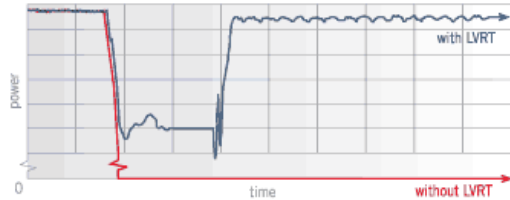
본 논문에서는 계통연계 풍력터빈의 인버터에서 저전압과 같은 계통 사고 시에 대한 LVRT 기능 구현과 저전압의 크기 및 사고 지속시간에 따른 LVRT 성능 시험을 통해 LVRT 기술개발이 되어 있지 않은 국내의 LVRT 기술에 대해 모색해보고자 한다. 풍력터빈에서 요구되는 LVRT 기능 적용은 향후 국내 풍력터빈의 해외시장 진출 시에 반드시 필요한 기술로 요구된다.

2. LVRT

LVRT는 저전압과 같은 계통사고 시, Fig. 1처럼 풍력터빈이 운전을 정지하지 않고 계속해서 운전을 유지하는 기능으로 해외의 풍력발전 선도국에서는 이미 풍력터빈에 대한 LVRT 기능 적용을 법제화하고 있는 추세이다.



(a) 계통의 30% 저전압 발생



(b) LVRT 기능 유·무에 따른 풍력터빈 운전결과
Fig. 1 계통 저전압 시, 풍력터빈의 LVRT 기능⁽¹⁾

2.1 각국의 LVRT 현황

현재 많은 나라에서는 각 나라별로 Table.1과 같이 계통 voltage dip에 따른 LVRT 동작 요구조건을 풍력터빈에서 갖추도록 하는 추세이며 이에 대한 기술들이 갖추어져 있다. 미국은 2005, 7월 발행된 FERC, ORDER NO. 661 "Interconnection for Wind Energy"에서 LVRT의 동작 범위를 규정하고 있는데 그 내용은 풍력단지에 적용되는 기술 기준의 LVRT Capability는 전압강하 시작 시점에서 0.625초를 넘지 않는 15%까지의 전압강하에 대해 풍력터빈은 계통연계를 유지해야 하며 전압강하 이후 3초까지 전압이 90%선까지 회복되는 영역에서는 트립되어서는 안된다고 명시하고 있다. 그리고 아일랜드는 2004년 8월 5MW 이상의 풍력발전단지에 대해서 LVRT 기능을 요구하는 규정을 만든 최초의 국가이며 영국은 2005년 4월이 규정을 강제하고 있다. 한편 WECC는 LVRT 규격

에서 풍력발전을 포함한 모든 발전소는 계통의 사고가 지속되는 동안에는 정격전압의 15% 전압강하 시에도 LVRT 동작 능력을 가져야 한다고 규정하고 있으며, 2006년 3월 1일 이후에 접속되는 10MW 이상의 풍력터빈에 적용되고 있다. 2006년 이후 협약된 독일의 E.ON-netz 경우, 풍력터빈은 계통이 영전압인 상황에서도 연계 운전이 지속되도록 요구하고 있으며 풍력발전 보급이 활발한 중국 및 인도 등에서는 LVRT 기능 적용에 대해 준비 중에 있다.

Table 1. 각 나라별 LVRT 요구조건⁽²⁾ [출처: RISO, 2007]

| Country | Voltage Level | LVRT capability | | | |
|---------------|---------------|-----------------|--------------------|---------------|-------------------|
| | | Fault duration | Voltage drop level | Recovery time | Voltage profile |
| Denmark | DS | 100msec | 25%U _r | 1.0sec | 2, 3-ph |
| | TS | 100msec | 25%U _r | 1.0sec | 1, 2, 3-ph |
| Ireland | DS/TS | 625msec | 15%U _r | 3.0sec | 1, 2, 3-ph |
| Germany | TS | 150msec | 0%U _r | 1.5sec | generic |
| Great Britain | TS | 140msec | 15%U _r | 1.2sec | generic |
| Spain | TS | 500msec | 20%U _r | 1.0sec | generic |
| Italy | >35kV | 500msec | 20%U _r | 0.3sec | generic |
| USA | TS | 625msec | 15%U _r | 2.3sec | generic |
| Ontario | TS | 625msec | 15%U _r | - | - |
| Quebec | TS | 150msec | 0%U _r | 0.18sec | positive sequence |

2.2 LVRT용 시험장치

LVRT 기능은 계통 저전압 발생 시, 풍력터빈의 운전 지속 능력으로 본 기능에 대한 성능 검증 시험을 위해서는 계통의 저전압 상황을 모의해야만 한다. 이때 필요한 장치가 LVRT용 시험장치로 실제 계통에 설치하여 저전압 크기와 사고지속시간을 임의로 조절할 수 있으며 평형 및 불평형 전원도 함께 모의할 수 있다. LVRT용 시험장치의 구성은 Fig. 3과 같으며 X1, X2 임피던스비에 의해 계통의 저전압 크기가 결정이 된다. 이미 해외에서는 LVRT 시험기기를 이용하여 풍력터빈에 적용된 LVRT 성능 시험 및 인증을 위한 장치로써 사용되고 있으며 독일의 WINDTEST 업체 같은 경우, LVRT용 시험장치 및 측정장비 등을 대며 및 설치하여 시험을 대행해주시기도 한다. 하지만 그 비용이 워낙에 고가(1회에 약 5억원 정도)이어서 추후 LVRT용 시험장치에 대한 국내 기술 개발이 필요할 것이다.

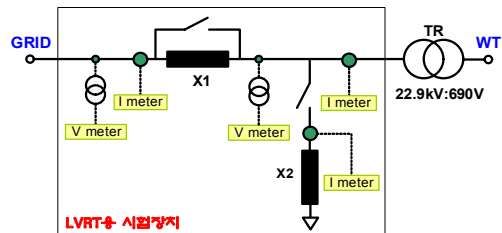
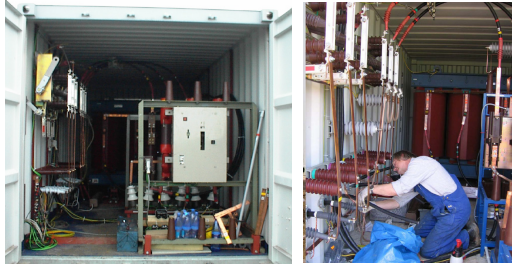


Fig. 3 LVRT용 시험장치 구성도



(a) LVRT 시험장치용 컨테이너(外)



(b) LVRT 시험장치용 컨테이너(內)
Fig. 4 LVRT용 시험장치

2.3 LVRT 구현

계통 저전압 상황에서 풍력터빈이 운전지속 가능하려면 인버터가 담당해야 하는 역할이 많아지게 된다. 즉, 정상운전 중에 특히나 정격운전 시, 인버터는 계통전압 강하가 발생하게 되면 인버터 설비용량의 제한으로 출력전력에 한계가 주어지기 때문에 능동적으로 출력전력을 제어할 수 있어야 한다. 하지만 발전기로부터 발전된 에너지를 인버터가 출력전력 제어만으로는 계통으로 충분히 공급할 수 없게 되어 잉여된 에너지는 발전기의 회전속도 증가 및 DC-link 단 전압 상승을 가져오게 된다. 따라서 잉여의 에너지를 처리하기 위해 추가적인 제어 방법들이 필요하게 되는데 그 중 계통 전압에 따른 발전기의 토크를 제어하여 발전기 출력을 줄이는 방법과 DC-link 단의 active crowbar를 이용하는 방법이 있을 수 있다. 물론 피치 제어를 이용하여 발전기 출력을 줄이는 방법이 제일 효과적일 수 있으나 수백 msec의 짧은 저전압에 대한 피치의 물리적인 응답속도는 너무 느리기 때문에 인버터와 피치의 복합적인 방법이 가장 효과적이다. 또한 LVRT 기능 외에도 저전력 계통 운영회사에서는 계통의 안정화를 위해 풍력단지 운영자에게 LVRT 기능을 통해 무효전력 공급을 요구하기도 한다. 따라서 인버터는 LVRT 기능 뿐만아니라 무효 전력도 자유롭게 공급할 수 있는 능력을 갖추어야 한다.

본 논문에서는 active crowbar 제어와 함께 LVRT 기능 구현을 시뮬레이션 및 실험을 진행하였으며 계통전압에 따른 발전기 토크 제어는 추후 연구개발 과제로 진행할 예정이다.

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

본 시뮬레이션은 현재 (주)유니슨에 의해 대관령에서 운영 중인 750kW급 PMSG용 풍력터빈에서의 출력특성을 계통 저전압 발생에 대해 관찰하기 위해 수행되었다. 시뮬레이션에서는 짧은 시간(수백

msec) 동안 정격전압의 각각 0%, 10%, 50%의 계통 저전압에 대한 인버터 출력특성을 다루었다. 또한 저전압에서 정상전압으로 복귀 시, 계통에 급격한 전력공급으로 인한 출력의 과도상태를 억제하고 안정적인 전력 공급을 위한 인버터의 유효분 전력제어의 전략적인 측면도 시뮬레이션을 진행하였다.

3.1.1 시뮬레이션 구성 및 결과

시뮬레이션은 Psim tool을 사용하였으며 구성은 Fig. 5와 같으며 시뮬레이션 조건은 Table 2.와 같다.

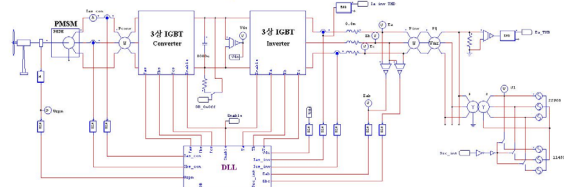


Fig. 5 시뮬레이션 구성도

Table 2. 시뮬레이션 조건

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|-----------|---------|------------|-------|
| 계통 정격출력 | 750kW | Grid 필터 | LCL |
| 계통 정격전압 | 690Vrms | 스위칭주파수 | 2kHz |
| 계통 정격전류 | 627Arms | DC-link 전압 | 1450V |

Fig. 6과 Fig. 7은 계통의 50% 저전압 시, 50%와 100% 출력에서의 인버터 출력특성 파형이다. 저전압으로 발생된 잉여 전력은 DC-link단 전압 상승을 가져오나 active crowbar 동작으로 DC전압 상승이 억제됨을 알 수 있다.

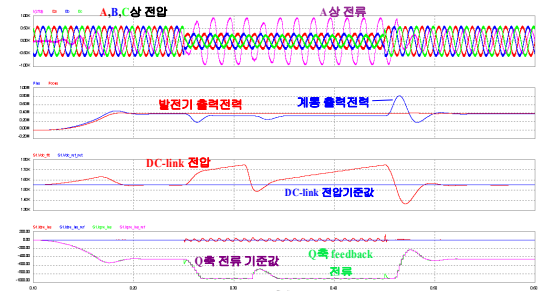


Fig. 6 50% 저전압 시, 인버터 LVRT특성(50% 출력)

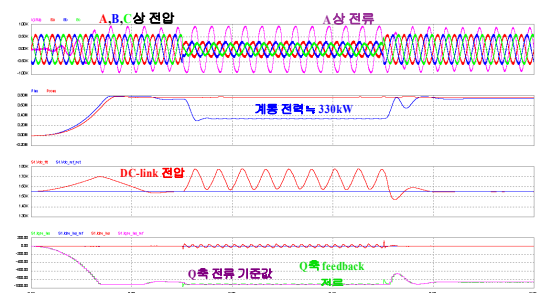


Fig. 7 50% 저전압 시, 인버터 LVRT특성(100% 출력)

Fig. 8과 Fig. 9는 계통 10% 저전압 시, 50%, 100% 출력에서의 인버터 동작특성 파형이다.

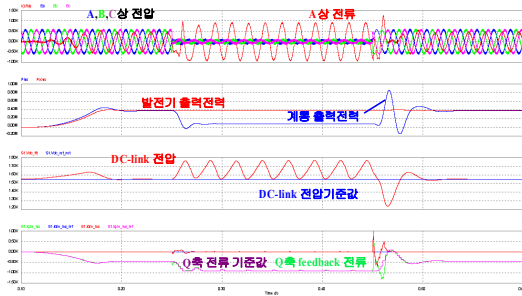


Fig. 8 10% 저전압 시, 인버터 LVRT 특성(50% 출력)

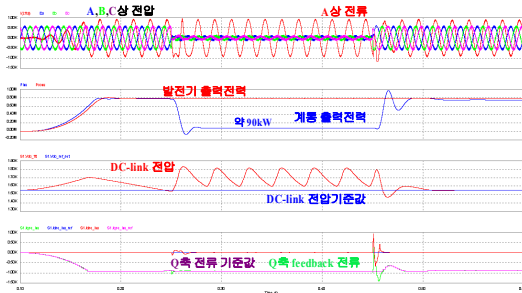


Fig. 9 10% 저전압 시, 인버터 동특성(100% 출력)

Fig. 10은 계통 영전압 시, 100% 출력에서의 인버터 동작특성 과형으로 출력전류를 0A로 제어함에 따라 발전기로부터 발전되는 전력은 active crowbar에 의해 모두 소모되어 더 이상의 DC 전압 상승이 억제됨을 알 수 있으며 전압 복구 시에는 유효전력량 조절로 계통에 안정적으로 전력이 공급됨을 볼 수 있다.

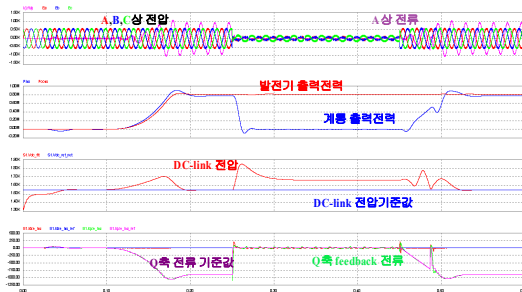


Fig. 10 영전압 시, 인버터 LVRT 특성(100% 출력)

3.2 실험 및 결과

본 실험을 위해 750kW급 풍력터빈의 축소형 Jig 시뮬레이터를 구현하였으며 실험을 통해 LVRT 알고리즘에 대한 검증과 active crowbar 동작을 포함한 인버터의 제어 및 동작 특성을 확인하였다.

3.2.1 실험 구성

시험 구성은 크게 Fig. 11처럼 generating을 위한 유도기와 동기기로 구성된 MG-set과 발전된 전력을 계통으로 공급하기 위한 back to back 인버터와 계통전압을 임의로 가변할 수 있는 계통사고 모의시험장치로 나뉜다.

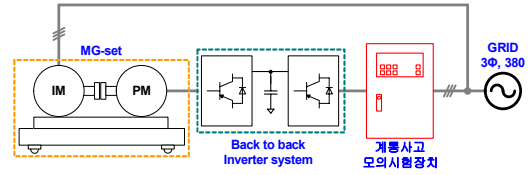
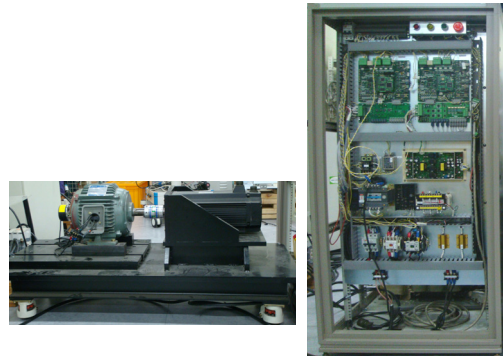


Fig. 11 10kW급 Jig 시뮬레이터 구성도



MG-set(유도기(左), 동기기(右))(左), Back to back 인버터(右)

Fig. 12 10kW급 Jig 시뮬레이터

본 실험을 위한 조건은 Table 3.과 같다.

Table 3. 실험 조건

| | MG-set | | 인버터 시스템 | |
|-----|-----------|---------|------------|---------|
| | Parameter | Value | Parameter | Value |
| 유도기 | 정격출력 | 5.5kW | 정격 용량 | 10kW |
| | 정격전압 | 380Vrms | 계통 정격전압 | 220Vrms |
| | 정격속도 | 1730rpm | 계통 정격전류 | 26Arms |
| 동기 | 정격출력 | 4.4kW | 필터 리액터 | 3mH |
| | 정격전류 | 30Arms | 스위칭주파수 | 2kHz |
| | 정격속도 | 1500rpm | DC-link 전압 | 360V |

3.2.2 실험 결과

Fig. 13은 계통의 60% 저전압 시(200msec 동안), 계통 전압/전류와 DC-link 전압 파형으로 전류제어기 한계 내의 전력에서는 active crowbar 동작 없이도 안정적으로 제어가 됨을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 14(a)처럼 10% 저전압 시, 전류제어기의 전류 한계를 넘는 전력에서는 DC-link 전압 상승으로 active crowbar가 동작하여 DC 전압 상승이 억제됨을 알 수 있다.

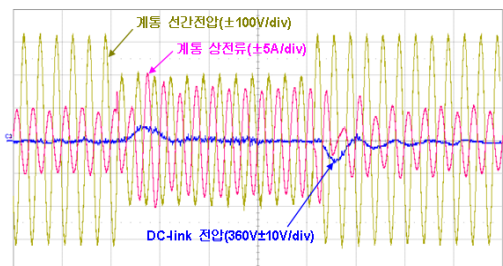
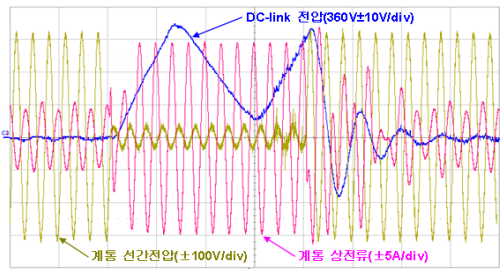
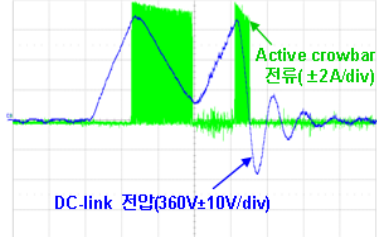


Fig. 13 60% 저전압 시, 인버터 LVRT 특성(50ms/div)

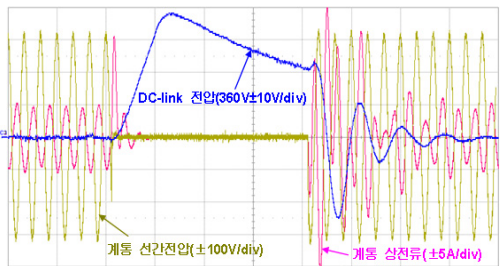


(a) 인버터 동작 특성(50ms/div)

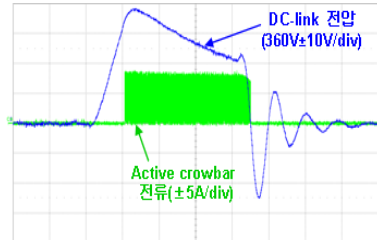


(b) active crowbar 동작 특성(50ms/div)
Fig. 14 10% 저전압 시, 인버터 LVRT 특성

Fig. 15는 계통 영전압(200msec 동안) 과형으로 영전압 동안 출력전류는 0A로 제어하며 발전기로부터 발전된 전력은 active crowbar에서 모두 소모된다.



(a) 인버터 동작 특성(50ms/div)



(b) active crowbar 동작 특성(50ms/div)
Fig. 15 영전압 시, 인버터 LVRT 특성

4. 결론

계통 저전압 시, 해외에서 요구하는 풍력터빈의 LVRT 기능은 active crowbar와 같은 부가장치가 함께 구현되어야 가능함을 알 수 있었다. 또한 계통전압 복귀 시, 인버터 제어만으로는 출력전류 및 DC-link 전압의 과도상태 구간이 발생하여 입력에너지를 줄이기 위한 발전기의 토크제어 및 피치제어 등이 병행되어야 시스템에 무리를 주지 않고 안정적인 계통연계 운전이 가능할 것이다.

추후 계획으로는 첫째, 계통 저전압 시 발생되는

잉여 전력을 active crowbar로 소모하던 기존의 방법에 계통전압에 따른 발전기 토크 및 피치 제어를 병행하여 시스템을 안정적으로 제어할 수 있는 방법을 모색한다. 둘째, 실제 계통에 LVRT용 시험장치 설치로 저전압 상황을 모의하여 인버터의 동작 특성을 확인하며 셋째, LVRT용 시험장치를 이용한 각상 불평형 저전압 상황에 대해 인버터 동작 특성을 확인한다.

References

- [1] Low voltage ride-thru technology, GE brochure, 2004.
- [2] Iov, F., Hansen, A.D., Sørensen, P., Cutululis, N.A., Mapping of grid faults and grid codes, Risø report, RisøR-1617(EN), 2007.