

마이크로 그리드에서의 풍력/디젤 복합발전 전력품질

김석우*, 고석환**, 장문석***

*한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터(wemins@kier.re.kr),
**한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터(korea19@kier.re.kr),
***한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터(msjang@kier.re.kr)

Power Quality of Wind/Diesel Hybrid Operation at an Micro Grid

Kim, Seok-woo* Ko, Seok-Whan** Jang, Moon-Seok***

*Wind Power Research Cenetr, Korea Institute of Energy Research(wemins@kier.re.kr),
**Wind Power Research Cenetr, Korea Institute of Energy Research(korea19@kier.re.kr)
***Wind Power Research Cenetr, Korea Institute of Energy Research(msjang@kier.re.kr)

Abstract

Wind/diesel hybrid operation can be one of the most effective option for electrical power production at a remote area such as Antarctica. The king Sejong station at Antarctica relies its power production on diesel engines and diesel oil is supplied every other year by ships. However, the oil transportation processes are liable to potential oil spillage caused by the floating ice around the King George island. The long-term storage of the oil at the station can also contaminate the surrounding soils. A 10kW wind turbine has been installed to save oil consumption and operated in connection with the diesel generators since 2006. The diesel engine that operated poorly during the first year of installation was replaced in 2008 to enhance power production an recent measurements indicate that both diesel power quality and the wind turbine availability have been dramatically improved by the replacement. This report discusses electrical power qualities of wind/diesel hybrid system operating at an isolated micro grid located in the king Sejong station. Our experience reveals that the similar technologies can be applied to domestic islands, for example, in the south sea.

Keywords : 소형 전력계통(Micro Grid), 전력품질(Power Quality), 풍력/디젤 복합발전(Wind/Diesel Hybrid), 가동율(Availability)

1. 서 론

의 맥스웰만(Maxell Bay) 연안에 위치한 세종
기지에서는 경유를 이용해 발전기를 가동하
남극 남쉐틀랜드군도(South Shetland Island) 고, 여기에서 얻어진 전기에너지를 이용해

투고일자 : 2009년 7월 2일, 심사일자 : 2009년 7월 15일, 게재확정일자 : 2009년 8월 12일
교신저자 : 김석우(wemins@kier.re.kr)

생활 및 연구에 사용하고 있다. 현재 세종기 지에는 총 900톤의 경유를 저장할 수 있는 저유탱크가 있고, 발전기, 온수보일러, 소각기 및 보유 증장비 등의 사용으로 매년 약 300톤 가량의 경유를 소비하며, 경유의 보급은 2년에 한번씩 이루어지고 있다. 기지의 전력 공급을 위해 총 5대 (275 kW 2대, 225 kW 2대, 113 kW 1대)의 발전기가 설치되어 있고, 기지 내 온수 공급을 위해 2대의 온수보일러가 설치되어 있다.

한국에너지기술연구원에서는 극지연구소와의 협동연구를 통해 2006년 2월 10kW급 풍력발전기 1기를 세종기지에 설치하여 디젤발전기와 연계한 풍력/디젤 복합발전을 실증하였으며 2009년 6월 현재까지 정상 운전 중이며, 설치 풍력발전기의 상세 제원은 다음과 같다.¹⁾

표 1. 10kW급 소형 풍력발전기 주요 제원

Cut-in Wind Speed	3.1 m/sec
Rated Wind Speed	19 m/sec
Furling Wind Speed	20 m/sec
Max. Wind Speed	54.0 m/sec
Rated Power Output	10kW, 60Hz
Rotor Diameter	7.0 m
Operation Temp.	-40 ~ 60°C

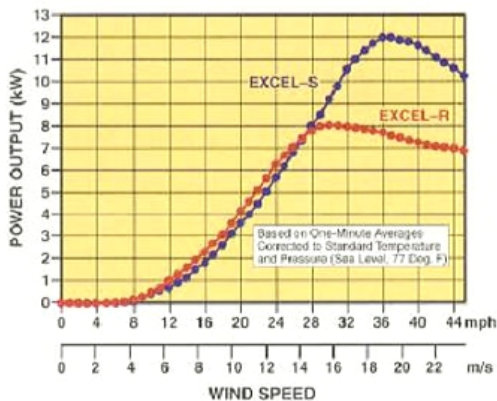


그림 1. 10kW 풍력발전기(Excel-S) 출력 곡선

본 연구에서는 풍력/디젤 복합발전에서 디젤발전기의 전력품질이 풍력발전에 미치는 영향 및 계통전력 품질의 향상을 위한 최적화 방안 등이 소개된다.

2. 풍력/디젤 복합발전

세종기지에 설치된 10kW급 소형 풍력발전기는 계통 연계형으로써 현재 세종기지에서 발전 중인 디젤발전기의 전력계통에 연계하여 운전될 수 있도록 시스템이 설계 및 제작되었다. 2008년 신규로 교체 설치된 세종기지 디젤발전기는 총 3기(275kW)이며, 1기씩 교대 운전을 통해 기지에서 소요로 하는 전력을 생산하고 있다. 신규 교체 설치된 디젤발전기는 CATERPILLAR 제품으로서 상세 제원은 다음의 표 2와 같다.

표 2. 275kW 디젤발전기 주요 제원

Rated Power	344 kVA 275 kW 0.8 Cosφ
Rated Voltage	380/220 V
Phase	3
Rated Frequency	60 Hz
Rated Current	522.7 A
Rated R.P.M	1,800
Generator Excitation Voltage	28 V
Generator Excitation Current	2.78000 A

현재 기지 일일 전력 부하량은 약 1,500 kWh이며, 최종 완성된 풍력/디젤 복합발전 시스템은 다음의 그림 1에 도시되었다. 따라서 전력품질 분석은 교체 전 디젤발전기와 연계된 2007년 전력품질 분석과 교체가 이루어진 2008년 측정 전력품질로 구분하여 수행하였다.

2.1 노후 디젤발전기 전력품질 영향분석

풍력발전과 디젤발전은 부하 추종성의 측면에서 서로 다른 특성을 지니고 있다. 풍력발전

의 경우 생산전력은 풍속의 변화에 따라 신속하게 변화함으로 인해 그 응답속도가 매우 신속하지만 디젤발전은 출력변화 속도가 풍력발전에 비해 매우 완만하다. 따라서 디젤 및 풍력발전이 기지 부하를 공동으로 담당하여 운전되는 도중 바람이 갑작스럽게 잦아들면 풍력발전에서 담당하는 만큼의 출력이 없어지게 되고 이를 디젤 발전기에서 신속하게 보충하기 위해 출력을 높여야 한다. 그러나 부하응답 속도가 늦으므로 인해 순간적이거나 기지에서 요구하는 부하량의 일부가 부족하게 생산되는 경우가 발생할 수 있으며 이는 디젤발전기의 비상정지 상태를 야기할 수도 있다.

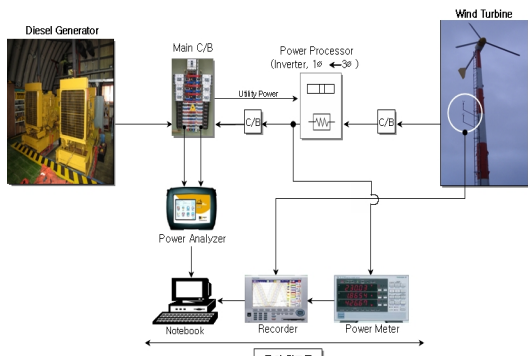


그림 2. 풍력/디젤 복합발전시스템

따라서 이러한 특성을 감안하여 적정 풍력발전량에 대한 사전 분석이 필요하며 매 순간 지속적으로 변화하는 풍력발전의 생산출력이 전력계통, 특히 디젤발전기에 미치는 영향에 대한 정량적이고 정성적인 연구가 필요하다.

2007년에 이루어진 전력품질 분석은 1988년 세종기지 최초 건설 당시 설치된 디젤발전기(CATERPILLAR 275kW 2기 및 225kW 2기) 4기와 연결된 풍력발전기의 복합발전 시스템을 대상으로 이루어졌다. 당시 디젤발전기는 설치된 총 4기의 발전기가 1기씩 교대운전을 통해 기지내 부하전력을 생산하고 있었으나, 노후화에 의한 전력품질의 저하가 발생하고 있었다.

복합발전 특성 분석을 위한 전력분석 측정계통도는 다음의 그림 3과 같이 구성되었다. 전력품질 분석을 위해 MV200 레코더와 미국 DRANETZ사의 PowerGuide 4400을 사용하였으며, 풍력발전기 출력단 및 디젤발전기 출력단에서 각각의 전력품질을 측정하였다.

풍력발전기 출력단이 기지 내 디젤 전력계통에 연계된 창고동 전력부하의 경우 전등(3kW)만 R상에 연계되어 사용되고 있었으며, 전등부하만 사용 시 창고동까지의 이격거리로 인한 전압강하의 영향으로 입력 전압이 187V로 측정이 되었다. 전력분석계상에서 측정된 주파수는 58.5Hz이었다. 국내 전기사업법상 규정에 의하면 표준전압의 허용 변동폭은 $\pm 6\%$ 로 규정되어 있으므로 220V의 경우 전압은 207V ~ 233V 이내의 범위에서 유지되어야 한다.

각 상의 전압변동율을 비교하여 보면 최소값의 경우 약 6.3%의 전압변동율이 측정되었으며, 최대값의 경우 5.5%임을 확인할 수가 있었다. 측정데이터는 창고동의 전력사용이 없는 상태, 즉 부하사용률이 0일 때 측정이 된 것이다. 전등부하 사용 시에는 전압강하에 의하여 189V 측정이 되었을 경우 10kW 풍력발전기가 정상상태로 동작이 될 수가 없었다. 이는 풍력발전기의 AC Line 입력의 경우 $\pm 10\%$ 의 전압강하율을 포함하고 있으며 그 이상 또는 이하의 전압입력이 있을 시에는 에러가 발생하도록 설계되었기 때문이다.

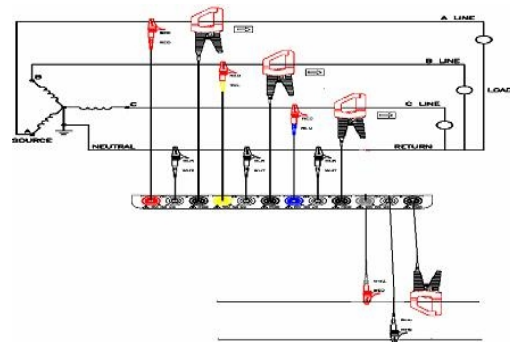


그림 3. 전력분석계 측정 계통도

세종기지에서 풍력발전기가 디젤전력계통에 연계된 상은 R상과 N상이다. 그림 4는 풍력발전기 운전 중 R상의 전압이 풍력발전기의 영향으로 220 ~ 230V 정도로서 S 및 T상보다 약 15V 이상 상승된 것을 확인할 수 있었다. 이같은 전압 불안정은 풍력발전기의 정상 운전을 저해하는 요소로써, 2008년 디젤발전기 교체 설치 이전까지 풍력발전기 운전가동을 저하의 주요 원인으로 작용하였다. 참고로 2007년까지 세종기지 풍력발전기의 가동율은 81.2%로서 일일 평균 전력생산량은 42.6kWh를 기록하였다. 이러한 가동율 역시 매우 높은 실적이나 이는 세종기지의 우수한 풍황자원에 기인한 것이며, 전력품질의 개선을 통해 85% 이상의 가동율을 기록할 수 있을 것으로 분석된다.²⁾

표 3 역시 풍력발전기가 연계된 R상의 전압이 S 및 T상에 비하여 높게 측정되고 있음을 정량적으로 보여주고 있다.

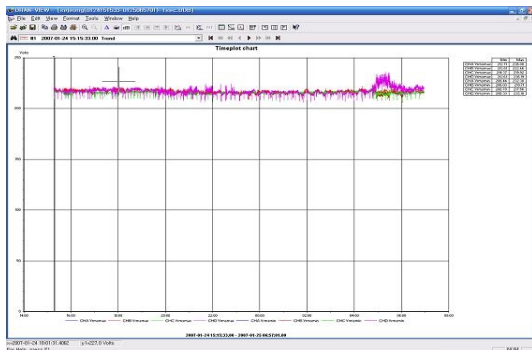


그림 4. 전력계통 3상간 전압 추이

표 3. 풍력발전기 상간 전압

구분	최소	최대
A(R상) V rmsmax	212.71	236.08
B(S상) V rmsmax	212.81	222.46
C(T상) V rmsmax	214.37	219.92
D(WT상) V rmsmax	212.61	236.19
A(R상) V rmsmin	206.44	232.30
B(S상) V rmsmin	206.03	219.71
C(T상) V rmsmin	206.70	217.56
D(WT상) V rmsmin	206.33	232.18

그림 5는 풍력발전기에서 생산되는 전압 및 전류 측정 결과로서 디젤 전력계통망과는 달리 풍력발전기 출력전압이 200 ~ 250V 범위에서 안정적으로 유지됨을 알 수 있으며, 6kW 이하의 낮은 출력에서 전압 변동폭이 더 큼을 보여준다.

풍력발전기의 무효전력은 저풍속 영역에서 높게 나타나고 높은 풍속에서는 현저히 감소하게 된다. 그림 6은 이러한 일반적 경향과 부합하나, 풍속 15m/s 영역에서는 일부 측정값이 크게 증가하고 있다. 이는 측정의 오류가 아닌, 설치 풍력발전기가 고풍속 영역에서 과속방지를 위해 꼬리날개를 접음으로써 회전자기 풍향으로부터 일정 각도로 회피하도록 Furling 기동을 함에 따른 특성에 의한 것이다.

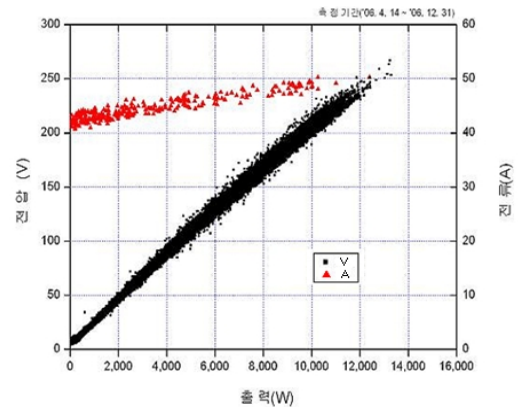


그림 5. 출력에 따른 전류/전압 변화

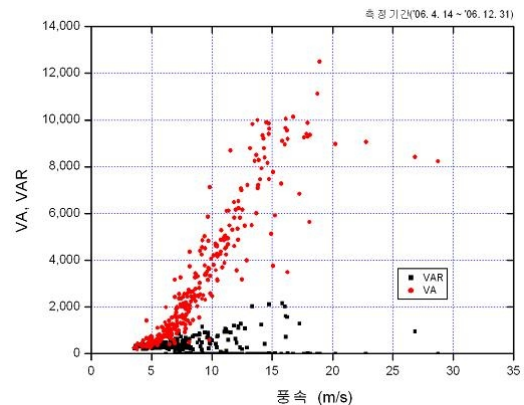


그림 6. 풍속에 의한 피상 및 무효전력 변화

주파수의 경우 주파수 변동이 +0.06Hz에서 -1.32Hz까지 변하고 있음을 확인할 수가 있었으며, 변동 주기 역시 상당히 급격함을 알 수 있다. 세종기지에 설치된 풍력발전기가 정상상태 발전을 위해서는 60±0.5Hz범위에서 계통 주파수가 유지될 수 있어야 한다. 그러나 표 2에서 확인한 바와 같이 기지 내 전력계통의 주파수가 매우 불안정하며, 이로 인해 풍력발전기는 정격운전 중에 에러가 발생되어, 자체 시스템 보호를 위해 대기모드로 전환됨을 알 수 있다.

표 4. 측정 주파수 최대/최소값

구 분	최대	최소
Total Frequency	60.06	58.68

이같은 주파수 불안정으로 인해 기지에서 사용 중인 전지/전자제품의 수명이 단축되는 등의 피해가 발생하고 있었으며, 동시에 전압 불안정과 주파수 불안정은 현재 운전 중인 풍력발전기의 정상적인 운전을 저해하는 요소로 작용하였다. 또한 잦은 풍력발전기의 에러 발생은 궁극적으로 운전 수명을 단축시키는 결과를 야기하게 된다. 그 원인으로는 현재 운전 중인 디젤발전기의 출력성능 저하가 가장 큰 요소로 작용하며, 이차적으로는 기지내 부하가 3상간에 균형있게 분포되지 않고 특정 상에 집중된 것이 원인이다.

2.2 신규 디젤발전기 전력품질 영향분석

2007년 말부터 2008년 초까지 이루어진 세종기지 대수선 공사 중 노후화된 기존 디젤발전기 4기의 교체가 이루어졌다. 이를 통해 2008년부터 275kW급의 신형 디젤발전기가 기지 전력생산을 전담하게 되었고, 동시에 특정 상에 집중된 전력부하의 문제점을 해결하고자 일부 부하의 재정렬이 수행되었다.

2009년 1월에 수행된 2차 전력품질 측정 및 평가는 세종기지와 같은 고립된 소형 전

력계통에서 풍력발전기 생산전력의 전압품질, 전류고조파 및 역률의 복합전력계통 연계 적합성 및 풍력발전기가 기존 전력계통에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다.

전력품질은 디젤발전기 출력(3상)단과 풍력발전기 출력(단상)단에서 실시하였다. 측정에 사용된 측정기기는 2007년 측정 당시에 사용되었던 레코더(MV200)과 전력품질 측정계(PowerGuide 4400)장비가 동일하게 사용되었다. 남극 세종기지의 전력부하 사용전력은 순시값 150kW 내외에서 동작하고 있었다.

디젤발전기의 각상의 전압은 그림 7과 같으며, 시간에 따른 전압변동은 그림 8과 같다. 그림에서 보는바와 같이 디젤발전기의 전압변동에 대하여 분석한 결과 부하특성에 따른 순간적 전압상승을 제외하고는 1%이내의 전압변동 특성을 보이고 있다. 전압 불평형률도 0.2%로 3상평형이 잘 이루어지고 평균 주파수는 60Hz 이다. 역률은 95% ~ 98%로 출력이 되고 있어 별도의 분석을 실시하지 않았다.

디젤발전기의 전력 분석 시에 10kW 풍력발전기가 연계되어 운전 중이었으며, 풍력발전기가 디젤발전기의 전압과형에 문제를 일으키지 않고 있음을 확인할 수 있다.

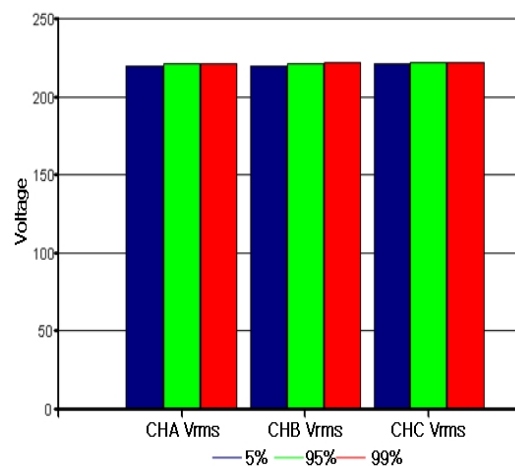


그림 7. 디젤발전기 전압특성

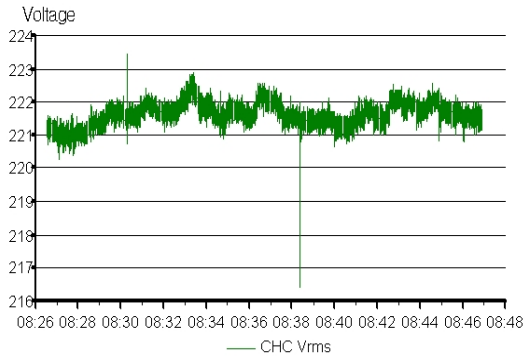


그림 9. 디젤발전기 T상 전압(풍력발전기 연계상)

그림 9는 풍력발전기가 연계된 상의 디젤발전기 측에서 측정된 고조파전류를 나타낸다. 풍력발전기의 고조파전류가 아닌 디젤발전기 운전 시에 발생하는 고조파전류로 추정할 수 있다.

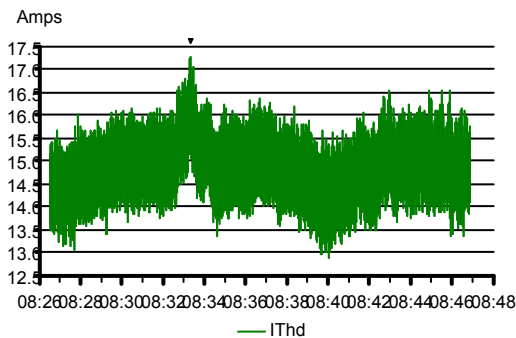


그림 10. 디젤발전기 T상 고조파 전류

풍력발전기는 3상중 S상에 단상으로 연계하여 발전이 되고 있다. 측정 시 T상에는 전등부하의 영향으로 전압이 200V ~ 220V 까지 변동하고 있었으며, 이는 디젤발전기로부터 거리가 약 700m 떨어져 있으므로 선로의 전압강하 영향으로 생기는 현상이다. 풍력발전기의 정격출력은 13m/s에서 10kW, 240V이다. 이로 인하여 선로 S상의 전압이 다른 상과 전압 불평형이 발생되고 있음을 확인하였다. 전압 불평형은 최대 2.5% 내에서 운전 중이며, 계통 주파수는 60Hz로 안정

적인 운전을 하고 있다.

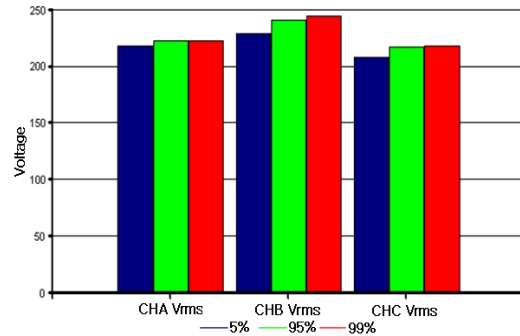


그림 11. 풍력발전기 계통연계상 및 전압분포

풍력발전기의 계통연계 평균 역률은 0.96 으로서 계통연계 기준에 적합하며, 고조파 전류는 정상전류 최대값의 3% 이내에서 운전되는 것으로 측정되었으며, 기존 전력계통에는 문제를 발생시키지 않고 있다. 이는 계통연계 인버터 내에 고조파 제거 모듈이 있어 발생 고조파의 일정부분을 제거하여 계통에 투입시키는 것으로 볼 수 있다.

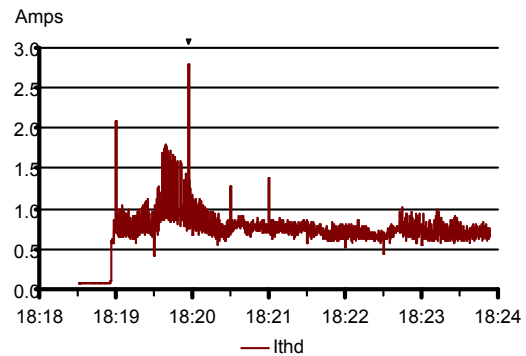


그림 12. 풍력발전기 S상 고조파 전류 특성

3. 결 론

고립된 소형 전력계통에서 풍력/디젤 복합발전 운전 시 디젤발전기 및 풍력발전기가 계통의 전력품질에 미치는 영향을 평가한 결과 세종기지의 풍황조건 고려 시 풍력/디젤

복합발전의 실용성을 확인할 수 있었다. 현재 풍력발전의 부하분담률은 약 3%로서 매우 미미하며, 이는 복합발전의 최초 실증운전임을 고려하여 주 전력원인 디젤발전의 안정적 운영을 확보하기 위해서이다. 또한 극지라는 지리적 여건 상 100kW급 이상의 중대형 풍력발전기의 운송 및 설치를 위한 각종 장비의 확보가 매우 어려운 상황이기 때문에 10kW급 소형 풍력발전기를 설치하였으며, 향후 다수의 동급 풍력발전기를 병렬 설치하여 운전이 가능하다는 확장성을 고려한 결과이다.

복합발전 시스템의 전력품질 측정결과를 다음과 같다.

- (1) 10kW급 이하의 소형 풍력발전기는 자체 인버터에 의해 전력품질이 매우 양호하게 유지되고 있었으며, 전압, 주파수 및 고조파 등 전반적 전력품질이 국내 전기사업법에 정한 규정을 충족시키고 있다.
- (2) 풍력발전기 설치 지점에서 측정된 3상간 전압 불평형률은 약 2.5%이며, 이는 저압선로의 전압불평형률 기준에 적합하며 풍력발전기를 3상으로 계통에 연계하여 운전하는 방안을 고려하여야 할 것이다.
- (3) 2007년 1차 전력품질 측정 시 발생하였던 계통 전압 및 주파수 등 전력품질의 저하는 디젤발전기의 노후화로 인한 것임이 확인되었으며, 2차 전력품질 측정에서는 전압 및 주파수 품질 저하로 인한 풍력발전기의 계통연계 차단이 전혀 발생하지 않았다.
- (4) 향후 풍력발전에 의한 전력생산량의 획기적 증대가 예상되며 이로 인한 디젤연료의 사용량 저감 및 환경오염 방지효과 역시 큰 증가가 예상된다.
- (5) 현재 디젤발전기의 운전 중단으로 인한 전력계통의 정전 발생 시 풍력발전기의 무부하 운전이 발생할 가능성이 있으므로, 이를 방지하기 위한 추가적인 제어장

치의 적용이 필요하다.

- (6) 디젤연료의 사용 저감을 통한 경제적 효과 극대화와 극지 청정환경 보전을 위해서는, 풍력발전기에서 생산되는 전력량을 실시간으로 측정하여 디젤발전기에서 생산되는 전력량을 상응하여 조절할 수 있는 통합 제어시스템의 개발 및 적용이 필요하다.
- (7) 통합제어 시스템의 적용이 이루어질 경우 현재 약 3%인 풍력발전 부하분담률을 최대 50%까지 확장할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김석우, 경남호, 2006, “극한환경에서의 소형풍력발전 실증운전”, 한국태양에너지학회지, 26(4), 25-30
2. 김석우, 김현구, 2007, “남극 세종기지의 전산유동해석에 의한 풍력자원평가”, 한국태양에너지학회 논문집, 27(3), 29-35
3. Seokwoo Kim, Hyun-Goo Kim, Moon-Seok Jang, 2006 Global Windpower, “Wind /Diesel Hybrid Operation at the Antarctica Region”
4. 김석우, 김현구, “남극 세종기지에서의 풍력자원 국소배치 민감도 분석”, 한국태양에너지학회지, 25(4), 1-9, 2007
5. D.A. Corbus, H.J. Green, A. Allderdice, K. Rand, J. Bianchi, “Testing of a 50kW Wind-Diesel Hybrid System at the National Wind Technology Center”, NREL/TP-440-21499, 1996