

한경풍력 2단계 연계에 따른 제주계통의 전력품질 분석

채우규
한전 전력연구원

Power Quality Analysis of Jeju System Due To Interconnecting Hangyung Wind Farm #2

Woo-kyu Chae
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 제주의 전력계통은 HVDC로 육지계통과 연계되어 있으며 3곳의 풍력발전단지가 연계되어 있다. 향후 대규모의 풍력발전이 연계된 상황에서 HVDC Overhaul을 시행하거나 어떤 사고로 HVDC가 끊어진다 면 제주계통을 정상적으로 유지하는 것이 어려울 수도 있다. 이에 본 논문은 Overhaul 기간에 한경풍력 2단계가 제주계통의 전력품질에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다.

Overhaul 기간에는 제주계통의 주파수가 매우 불안정하여 풍력발전량의 급격한 변동에 의하여 제주계통 전체의 주파수가 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

풍력발전시스템은 국제 환경의 변화 및 유가 상승과 경제성 및 기술의 성숙도로 인해 에너지 산업에서 세계적으로 가장 빠르게 성장하는 분야가 되었다. 2007년 세계 풍력발전 신규 설치용량이 20GW를 넘게 되어 2007년 말 전 세계의 총 풍력발전 설비용량은 94GW가 되었다. 2012년에는 설비용량이 약 240GW가 될 전망이다. 우리나라 역시 정부의 정책에 의하여 2012년 까지 2,250MW의 풍력발전을 설치하려는 계획을 갖고 있다.[1]

현재 제주도는 행원과 한경에 약 30 MW의 풍력발전이 연계되어 운전되고 있고 향후 약 85 MW의 추가 연계가 예정되어 있다. 전체 계통 설비용량에 비하여 풍력발전 용량이 적을 때는 풍력발전 출력의 변동이 계통 주파수에 큰 영향을 주지 못하였으나 용량이 계속 증가하게 되면 전력품질 및 계통 안정도에 여러 가지 측면에서 영향을 미치게 되므로 이에 대한 대비책이 필요하다[2].

지금까지의 많은 연구들은 주로 과도상태에서 대규모 풍력발전이 제주계통에 어떤 영향을 줄 수 있고 제주계통을 안정적으로 운영하기 위하여 연계 가능한 풍력발전의 최대용량을 얼마로 산정할 것인가에 대하여 한정되어 있었고[2-3] 유사한 연구가 진행중이다. 또한 풍력발전 자체에서 생산하는 전력품질에 대한 측정 및 분석은 다수 있었고 품질평가 기관에 의하여 분석되고 있지만[4-5] 전력계통에 어떤 영향을 주는 지에 대한 분석은 저조한 것이 사실이다.

본 논문에서는 2008년 5월에 실시된 HVDC Overhaul 기간을 이용하여 변전소 및 한경풍력 2단계에서 전력 품질을 측정하고 분석하여 Overhaul 기간에 풍력발전이 제주계통에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였다. 해당 기간에 풍력발전량에 따른 인근 D/L의 전력품질 영향 정도를 분석하기 위하여 풍력발전의 연계점(PCC, point of common coupling) 및 풍력발전이 연계된 주변압기(MTr)와 동일 MTr에서 인출된 D/L에서 동시에 측정하였다. 측정된 결과에 대하여 주파수, 전압변동, 전압/전류 고조파, 플리커 등 5가지 항목에 대하여 전력 품질을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 전력품질 유지기준

2.1.1 주파수 유지범위

산자부의 전기품질 유지기준(고시)에 따르면 계통주파수를 정상시 60±0.2 Hz의 범위 이내로 유지하고 비상상황의 경우 62-57.5 Hz 범위 내에서 유지할 수 있도록 되어 있다.

2.1.2 전압의 유지 범위

배전선로의 전압은 ULTC를 이용하여 표 1과 같이 유지하도록 규정되어 있다.

표 1. 배전선로의 전압유지 범위

| 구 분 | 범 위 |
|-----------------------|---|
| 배전선로에서의 유지 범위 | 12,000 V - 13,800 V 20,800 V - 23,800 V |
| 주변압기(MTr)의 송출전압 유지 범위 | 22.9 kV + 4 % ~ -1 % (23,816 V ~ 22,671 V) |

2.1.3 고조파

배전계통의 고조파 관리 기준은 현재 THD기준으로 3% 이하로 되어 있고 각 고조파 차수별로는 정의되어 있지 않은 상태이나 향후 이 기준을 개정할 예정이다.

2.1.4 플리커

현재 국내의 플리커 관리 기준은 ΔV10≤0.45 로 되어 있으나 ΔV10을 개발한 일본조차 이 기준을 사용하지 않고 있으며 IEC 기준에 준하여 기준을 개정하려는 움직임을 보이고 있다. 현재 IEC에서 권장하는 배전계통의 플리커 관리기준은 다음과 같다.

$$P_{st} \leq 0.9$$

$$P_{lt} \leq 0.7$$

이때 Pst의 계산에는 주기적으로 측정된 플리커 지수(최소한 초당 50개)의 값에 대한 누적확률밀도함수가 이용된다. 누적확률밀도함수의 모양은 전압요동의 성질에 따라서 매우 다르므로, 이것을 적당히 나타내기 위한 알고리즘으로 multipoint algorithm이 이용된다. Pst를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$P_{st} = \sqrt{(0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50})} \quad (1)$$

Plt는 12개의 연속된 Pst 값으로 이루어지며 수식으로

나타내면 식 (2)와 같다[7].

$$P_k = 3 \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} P^3_{\omega_j}} \quad (2)$$

2.2 한경풍력 2단계의 전력품질 분석

2.2.1 제주계통 개요

제주도의 부하량은 최저 350[MW]에서 최대 510[MW] 정도이며 현재 약 30[MW]의 풍력발전을 상용운전하고 있으며 향후 85.8MW 용량의 추가 건설 계획이 추진 중이다[6]. 전력계통 구조는 10개의 154 kV 모선에 송전망은 환상망을 이루고 있고 제주도내의 북제주 모선과 내륙 해남지역의 모선이 2회선의 연계선(HVDC)으로 연결되어 있다. 제주 계통은 연계선에 의하여 연평균 40% 정도의 전력을 공급 받고 있고 5단계의 부하 차단을 통하여 사고에 대응하도록 설계되어 있다[2].

2.2.2 한경풍력 2단계 개요

한경풍력 2단계는 3[MW] 풍력발전기 5대로 구성되어 있으며 상세한 내용은 표 2와 같다.

표 2. 한경풍력 2단계 개요

| 구분 | 내용 |
|--------|---------------|
| 발전용량 | 3,000[kW] |
| 제조사 | Vestas |
| 제어방식 | Pitch Control |
| 발전기 수량 | 5대 |
| 발전기 종류 | DFIG |

2.2.3 주파수 변동

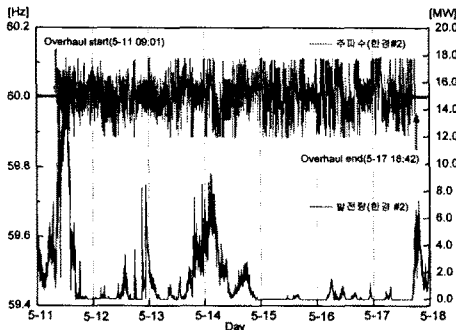


그림 1. Overhaul 기간 중 풍력 발전량 및 주파수

그림 1은 한경풍력 2단계의 발전량(하단)과 주파수(상단)의 상관관계를 나타내는 그래프이다. 분석결과 두 지점(한경풍력 및 청수D/L)의 주파수가 동일하기 때문에 한곳의 값만 그래프로 나타내었다.

예상했던바와 같이 Overhaul이 시작된 이후가 그 전에 비하여 주파수 변동이 심한 것으로 나타났다. 위의 그래프로는 풍력 발전량이 주파수 변동에 어떤 영향을 미치는지 판단할 수 없기 때문에 풍력발전량의 변동이 매우 심했던 시점을 선택하여 분석하였다.

그림 2 및 3은 Overhaul 기간 중에 풍력발전이 계통 주파수에 어떤 영향을 미치는가를 나타내는 그래프이다. 해당 그래프들은 측정기간 중 풍력발전량의 변동이 매우 심했던 시기를 골라 정밀하게 그렸다.

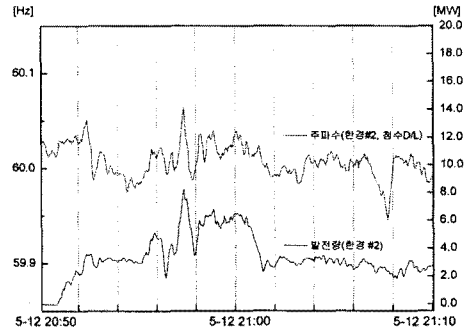


그림 2. 풍력발전 급변동에 따른 주파수 변화

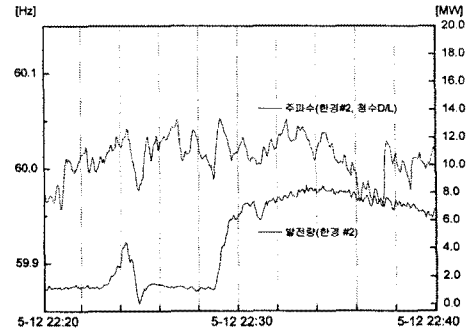


그림 3. 풍력발전 급변동에 따른 주파수 변화

일반적으로 어떤 계통에서 전체 발전량이 부하에 비하여 많게 되면 계통 주파수가 상승하고 그 반대이면 주파수가 하강하게 된다. 그림 2 및 3에서도 풍력발전량의 급격한 변동(수 MW의 변동)이 있던 시점에서 주파수가 발전량에 비례하여 변동하는 것을 알 수 있다. 이는 Overhaul로 인해 작아진 제주계통에서 풍력발전량의 급격한 변동을 기존 발전소에서 빠르게 추종하지 못했기 때문으로 추정된다. 부하의 영향을 고려할 수도 있겠으나 여러 그래프의 패턴으로 보아 풍력발전량의 급감이 주파수 변동의 주요한 요인으로 보인다.

2.2.4 전압변동

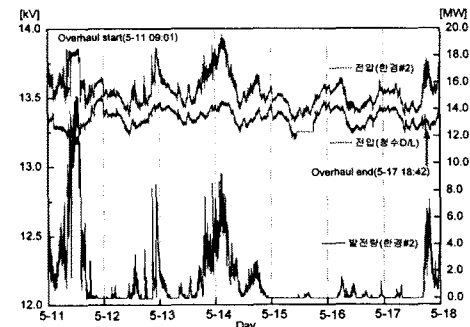


그림 4. Overhaul 기간 중 풍력 발전량 및 전압변동

그림 4는 한경풍력 2단계의 발전량(하단)과 계통 전압(상단:풍력발전, 중단:청수D/L)의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

이미 알려진 바와 같이 연계점의 전압은 풍력발전량에 비례하여 변동함을 알 수 있다. 풍력발전량이 많을 때 모선의 전압보다 높게 형성되어 연계기준인 13,800[V]를

상회하는 경우가 발생하고 있다. 그러나 5월 11일 및 17일의 결과로 미루어 볼 때 풍력발전이 인근 D/L의 전압변동에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단되며 청수 D/L의 전압변동은 부하변동에 따라 OLTC(또는 AVR)에서 기인한 것으로 보인다.

2.2.5 전압 고조파

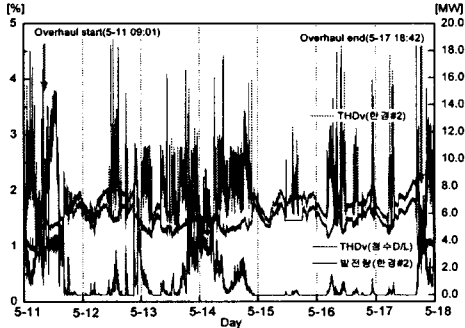


그림 5. Overhaul 기간 중 풍력 발전량 및 전압THD

표 3. 발전량에 따른 차수별 전압고조파 크기

| | 13:05 | 12:37 | 13:29 | 13:35 | 13:37 |
|------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 발전량 | 15MW | 509kW | 334kW | 897kW | 3.2MW |
| THDv | 0.99 | 4.73 | 2.24 | 4.34 | 2.03 |
| V[V] | 13823 | 13545 | 13499 | 13559 | 13630 |
| V1 | 13823 | 13529 | 13495 | 13546 | 13627 |
| V3 | 6.3 | 29.91 | 24.9 | 30.9 | 30.6 |
| V5 | 99.3 | 181.94 | 165.2 | 176.7 | 146.9 |
| V7 | 22.3 | 20.27 | 17.9 | 24.0 | 15.3 |
| V9 | 17.2 | 5.72 | 9.9 | 6.1 | 5.5 |
| V11 | 36.5 | 244.14 | 134.0 | 241.5 | 164.5 |
| V13 | 12.6 | 57.21 | 191.7 | 501.4 | 154.3 |
| V15 | 24.3 | 43.91 | 68.5 | 38.1 | 50.5 |
| V17 | 42.8 | 31.42 | 36.3 | 28.6 | 25.0 |
| V19 | 36.3 | 6.78 | 18.0 | 11.3 | 23.7 |
| V21 | 21.5 | 9.07 | 5.4 | 8.0 | 5.9 |
| V23 | 15.2 | 29.71 | 17.2 | 24.2 | 2.4 |
| V25 | 11.8 | 23.94 | 17.1 | 17.0 | 3.1 |
| V27 | 5.1 | 6.20 | 3.3 | 5.1 | 2.5 |
| V29 | 4.3 | 10.35 | 4.4 | 8.5 | 6.4 |
| V31 | 5.1 | 5.62 | 6.6 | 8.1 | 2.4 |
| V33 | 9.9 | 14.63 | 6.6 | 12.6 | 3.4 |
| V35 | 9.3 | 15.89 | 9.3 | 10.4 | 11.2 |
| V37 | 5.4 | 11.45 | 10.2 | 7.0 | 3.4 |
| V39 | 4.0 | 2.86 | 2.8 | 2.6 | 3.2 |

그림 5는 한경풍력 2단계의 발전량(하단)과 전압고조파(상단:풍력발전, 중단:청수D/L)의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

현재 '분산형전원 배전계통 연계기술 기준'에는 고조파 전류 유출량에 대한 규정치는 있지만 고조파 전압에 대한 규정치는 없기 때문에 규정 초과여부를 결론내리기는 곤란하다. 발전량이 전혀 없을 때는 전압THD가 약 2% 내외(Overhaul 이후에는 1% 내외)에서 유지 되고 있으며, 발전량이 비교적 적은 구간(5MW 이하)에서는 발전량에 비례하여 전압THD가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 발전량이 비교적 많은 11일, 14일, 18일 등에는 오히려 전압THD가 감소하는 것으로 미루어, 발전량이 비교적 적은 구간에서 연계점의 전압 파형이 보다 심하게 왜곡되며 전력품질을 저하시키는 것으로 판단된다.

특히 순간적으로 전압THD가 4% 이상 상승하는 현상이 나타나고 있는데 한경풍력 1단계에서는 나타나지 않는 현상이다. 표 4는 전압THD가 4%이상 되는 특정 시점과 발전량이 15[MW] 일때의 고조파 차수별 크기를 나타낸 것이다. 발전량이 1[MW]가 되지 않는 시점에서 11고조파와 13고조파가 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 이는 DFIG의 고유한 특성으로 판단된다.

그러나, 청수D/L 전압THD의 추세를 미루어 볼 때 풍력발전량이 인근 D/L의 전압THD에 영향을 주었다고 판단할 수 없다.

2.2.6 전류 고조파

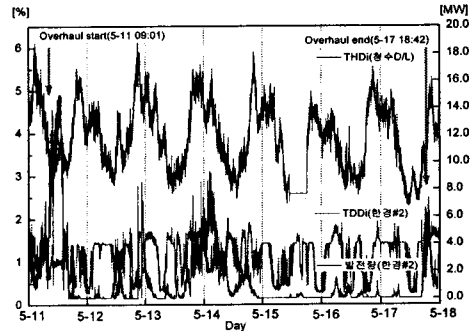


그림 6. Overhaul 기간 중 풍력 발전량 및 전류TDD

그림 6은 한경풍력 2단계의 발전량(하단)과 전류고조파(상단:청수D/L, 중단:풍력발전)의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

'분산전원 배전계통 연계 기술기준'에 명시된 바와 같이 고조파전류의 왜곡정도를 평가하기 위해서는 TDD 지수를 이용해야 한다. TDD를 계산하기 위해서는 설비의 발전용량을 고려해야 하며, 한경풍력 2단계의 총 발전용량은 15MVA이므로 $IL=380[A]$ 로 가정하였다. 일반적으로 기존의 풍력발전기는 발전량이 증가하면 그에 비례하여 고조파가 많이 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 한경풍력 2단계의 경우 TDD가 발전량에 반비례 하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 최신 사양의 DFIG 방식을 채택하여 보다 정현파에 가까운 전류를 생산하기 때문이다[9-11].

한경풍력 1단계에 비하여 발전량(설비용량)이 많음에도 불구하고 TDD가 2% 이하로 유지되고 있으며 이는 연계기준을 만족하는 수치이다. 또한 풍력발전이 인근 D/L에 별다른 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다.

3.2.7 플리커(Pst)

그림 7은 한경풍력 2단계의 발전량(하단)과 플리커(상단:풍력발전, 중단:청수D/L)의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

연계기준에는 플리커에 대하여 $Epst \leq 0.35$ (10분)로 정의하고 있으나 본 논문에서 사용한 프로그램은 Pst만을 측정할 수 있다. 이때 $Epst$ 는 계통의 변동을 배제한 풍력발전에 의해서만 나타나는 플리커 지수이며, Pst는 계통의 전압변동까지 고려한 지수이다.

청수D/L 및 연계점의 Pst가 평상시에 0.1이하에서 형성되는 것으로 보아 연계점에서의 Pst는 대부분 풍력발전에 의해 결정되는 것으로 판단할 수 있다. 그림 9에서 발전량이 많고 변동성이 심한 경우에는 Pst가 0.7~0.8 정도까지 기록되는 것을 알 수 있다. 이는 계통전체의 기준인 0.9를 만족하진 않지만 단일 풍력단지에서 발생

되는 Pst로는 상당히 큰 편으로 판단된다.

또한 한경풍력 1단계의 측정결과와 비교해 볼 때 한경풍력 2단계의 Pst는 상당히 큰 값을 기록하고 있다. 비록 DFIG 시스템의 제어기술이 플리커, 고조파 등에 최적화 되어 전력품질을 개선할 수 있지만[9-11] 발전용량이 커짐에 따라 풍력발전기 출력의 급변으로 플리커가 높게 나타나는 것으로 분석되었다.

[9] S. Muller, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", IEEE Ind. Applicat. Mag., pp. 26-33, May/June 2002.
 [10] M. G. Simoes, "Renewable Energy Systems(Design and Analysis with Induction Generators", CRC, 2007
 [11] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems", John Wiley & Sons, 2005

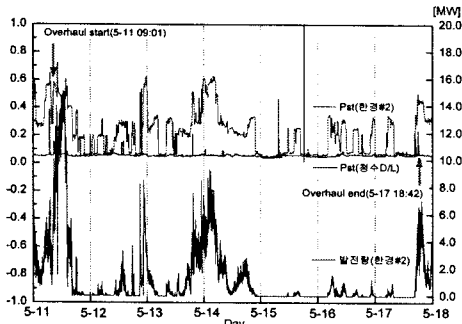


그림 7. Overhaul 기간 중 풍력 발전량 및 Pst

3. 결 론

본 논문에서는 HVDC Overhaul 기간 중 풍력발전단지 및 배전용변전소의 전력 품질을 측정하고 분석하여 연계기준 만족여부를 검토하였으며 풍력발전이 제주계통에 어떤 영향을 미치는지를 이론적인 접근보다는 측정을 통하여 분석하였다.

HVDC Overhaul 기간은 제주계통이 육지계통과 분리되어 운전되고 있는 상황으로 제주계통의 주파수가 규정치를 만족하기는 하지만 매우 불안정한 모습을 보였다. Overhaul 기간에 풍력발전량의 급변동이 있을 경우 그에 비례하여 제주계통 전체의 주파수가 흔들리는 것으로 보아 향후 대규모 풍력발전단지의 계통연계시 주파수 유지 문제도 고려해야 할 것으로 판단된다.

한경풍력 2단계의 경우 발전량이 1[MW] 이하에서 전압고조파가 순간적으로 5% 가까이 상승하는 현상이 발견되었는데 분석결과 11차 및 13차 고조파에 의한 것으로 나타났다. 한경풍력 1단계와 비교해 볼 때 DFIG의 고유한 특성으로 보이며 향후 DFIG를 이용한 대규모 풍력발전단지 건설시 고려사항 중 하나가 될 것이다. 전류고조파 측면에서는 DFIG 형태가 좀더 안정적이었으나 한경풍력 2단계가 1단계에 2.5배의 용량을 가지기 때문에 플리커 지수는 매우 높게 나타났다.

[참 고 문 헌]

[1] Global Wind Energy Council, 'Global Wind 2007 Report', 2008, 5
 [2] 황교익, "제주계통 단독운전 시 주파수 안정도 유지를 위한 풍력발전 운전용량 산정 방법에 관한 연구", 대한전기학회 논문집, 56권 2호 pp. 233-239, 2007
 [3] 산업자원부, "풍력발전단지가 연계된 계통의 과도상태 해석 및 연계 허용용량에 관한 연구", 최종보고서, 2005.10
 [4] IEC, "IEC 61400-21", 2001
 [5] 김건훈, "제주 월령 시범단지 풍력발전시스템 성능시험 및 결과의 고찰", 한국에너지공학회지, 제10권 제1호, pp. 10-16, 2001
 [6] 김영환, "제주지역 풍력발전기에 의한 전력계통운영 영향분석", 대한전기학회 하계학술대회, A권, pp.127-129, 2007
 [7] Roger C. Dugan, "Electrical Power System Quality 2nd Edition", McGraw-Hill, 2002
 [8] 한국전력공사 배전처, "분산형전원 배전계통 연계기술 해석서", 2006