

# 配置不同类型风机的风电场电能质量测量及比较

李 群, 陈 兵, 袁晓冬, 史明明, 罗珊珊

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100)

**摘 要:** 本文分别对配置 FSIG+PMSG 和 DFIG 两风电场的电能质量状况进行长时间连续测量, 两风电场装机容量和接入电压等级不同, 依据测量数据对两风电场并网点的谐波、电压偏差、电压闪变、电压不平衡度以及频率偏差等电能质量指标进行比较分析; 其次根据两风电场全年运行监测数据, 对两者功率变化率、有功与无功变化关系、功率与频率变化关系, 以及输出功率与风速变化关系进行比较分析; 最后分析了风电场低电压穿越能力对电网的影响, 并且对风电场低电压穿越能力进行了仿真研究。论文最后给出了研究得出的一些结论, 主要是针对配置不同类型风机以及接入不同电压等级电网的风电场在电能质量、出力特性、无功补偿、LVRT 能力等方面的结论。

**关键词:** 电能质量; 测量; 风电场; 低电压穿越能力

## 0 引言

随着世界各国对可再生能源利用的日益重视, 风力发电得到了迅猛的发展, 2012 年全世界累计风电装机容量达到 282.482GW, 预计到 2020 年将达到 7.59 亿千瓦。在中国, 风力发电在可再生能源发电中的发展规模和速度已居于首位, 2012 年全国累计风电装机容量就已达到 75.324GW, 预测 2020 年将超过 2 亿千瓦。然而, 由于我国电网结构相对薄弱, 随着风电大规模的并网运行, 势必对电网的安全、稳定、可靠运行带来严重的挑战, 其中电网电能质量问题是重要体现<sup>[1-5]</sup>, 主要体现为电压质量、功率潮流变化以及承受低电压能力(LVRT)等方面。

本文以江苏大丰风电场和凌洋风电场为例, 对其电能质量状况进行测量和比较, 同时对其 LVRT 能力进行了仿真分析。选此两个风电场的主要原因是两者的风机类型和并网电压等级不同, 大丰风电场配备的是恒速恒频笼型异步发电机(FSIG)和直驱同步发电机(PMSG)两种类型风机, 其中 FSIG 单机容量 0.75MW, 81 台; PMSG 单机容量 1.5MW, 93 台, 总装机容量 200.25MW, 接入 220kV 电网。而凌洋风电场配备的是双馈感应发电机(DFIG), 单机容量 1.5MW, 33 台, 总装机容量 49.5MW, 接入 110kV 电网。依据中国国标 GB/T14549、GB/T15945、GB/T12325、GB/T12326、GB/Z19963, 通过对配置不同类型风机及接入不同电压等级电网

的风电场电能质量的测试、仿真及比较分析, 得到各风电场电能质量之间的差异情况, 为分析配置不同类型风机的风电场大规模并网电能质量问题提供基础和参考, 为实施改善措施提供科学依据。

## 1 风电场电能质量测量及比较

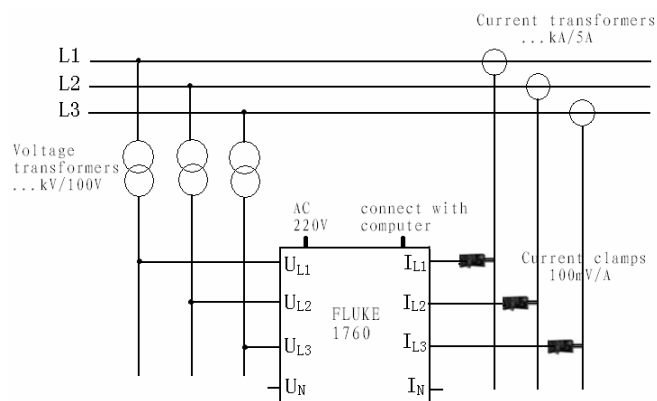


图 1 风电场并网点电能质量测试接线图

大丰风电场和凌洋风电场均位于中国江苏黄海沿岸, 同属陆地风电, 两地直径距离约 80km, 气候与风力相当, 易于对电能质量进行比较。通过采用 FLUKE1760 电能质量分析仪对两风电场电能质量状况同时进行连续 48 小时测量, 测试指标包括谐波电压、谐波电流、三相电压不平衡度、电压闪变、电压偏差、频率偏差等。图 1 为风电场并网点 FLUKE1760 电能质量分析仪测试接线图, FLUKE1760 电能质量分析仪符合 IEC61000-4-30 A

级标准要求,并遵循 IEC61000-4-7、IEC61000-4-15、IEC61000-4-30、EN50160 等国际标准对在线测试数据进行处理。

图 2~图 4 和表 1 为两风电场稳定运行时电能质量指标测试数据和统计图表。图 2 为两风电场测试期间并网点短时间电压闪变和平均风速变化关系(每 10 分钟统计值),风电机组并网运行引起的电压波动及闪变,源于波动的功率输出,即主要取决于风况变化。由图 2 可见,两风电场短时电压闪变值均远低于国标限值 0.8;电压闪变值随风速增大而增大,当风速达到额定时速变值减小;恒速风电机组引起的闪变问题一般相对较为严重,但接入高电压等级电网中(电网短路容量大),可有效的抑制闪变,220kV 接入的大丰风电场电压闪变明显小于 110kV 接入的凌洋风电场。

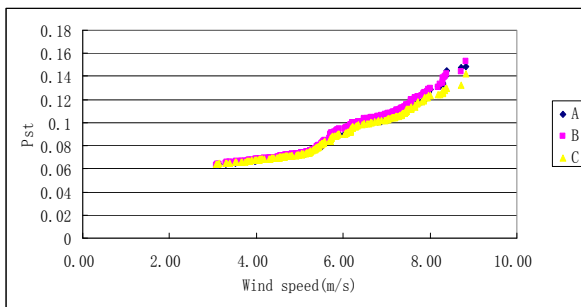


图 (a): 大丰风电场

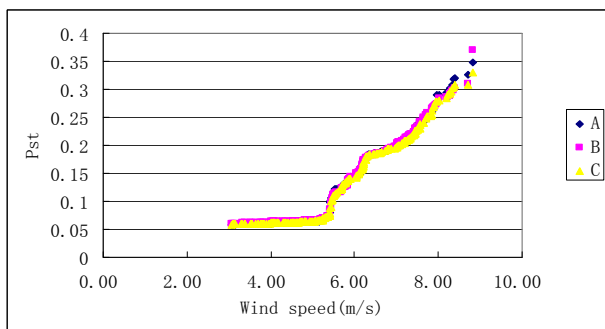


图 (b): 凌洋风电场

图 2 测试期间两风电场并网点短时间电压闪变与平均风速关系 (a: 大丰风电场, b: 凌洋风电场)

图 3 为两风电场测试期间并网点母线电压偏差和风速变化关系图(每 10 分钟统计值),由图 3 可见,两风电场母线电压偏差均低于国标限值 10%,且电压偏差值也随风速波动增大而增大,其原因是随着风速的增大,风电场向电网注入的有功功率波动幅度也随之增加。

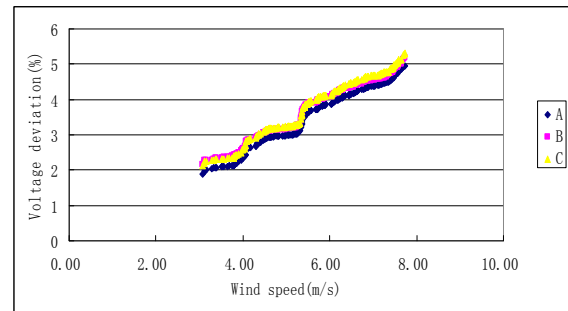


图 (a): 大丰风电场

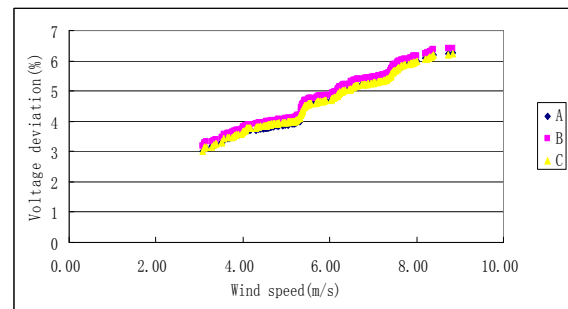


图 (b): 凌洋风电场

图 3: 测试期间两风电场并网点电压偏差与风速变化关系 (a: 大丰风电场, b: 凌洋风电场)

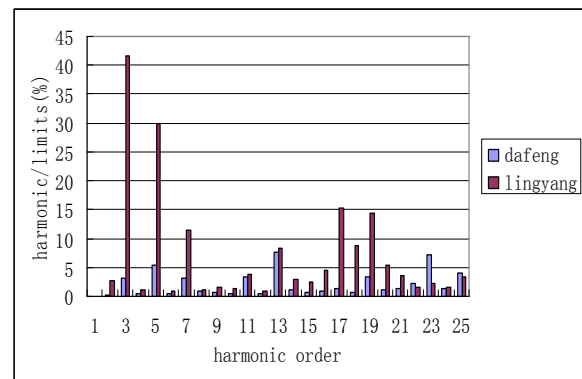


图 4 测试期间两风电场各次谐波电流含量占国标限值比例

不论何种类型的风电机组,发电机本身产生的谐波是可以忽略的,谐波电流的真正来源是风电机组中的电力电子元件。对于恒速恒频笼型异步发电机(FSIG),在持续运行过程中没有电力电子元件的参与,几乎不会产生谐波电流,风电场谐波的产生主要来自直驱同步发电机(PMSG)和双馈感应发电机(DFIG)。由于两风电场装机容量不同、接入的电压等级不同、接入点系统短路容量和设备容量也不同,所以对谐波电流注入量的限值也不同。通过两风电场各次谐波电流含量占国标限值比例(见图 4),可以清楚反映谐波电流的相对状况。由图 4 可以看出 220kV 接入的大丰风电场谐波电流含

量明显小于 110kV 接入的凌洋风电场，且异步风机在谐波注入方面明显小于双馈风机。

表 1 为测试期间两风电场各项电能质量指标测试数据及国标允许值。依据电能质量中国国家标准，对电压偏差采用正负偏差绝对值之和作为判断是否合格的依据；对频率偏差和长时间电压闪变的测量结果以最大值作为判断是否合格的依据；对谐波、短时间电压闪变、三相电压不平衡度的测量结果以 95% 概率值作为判断是否合格的依据；从表 1 可以看出测试期间两风电场各项电能质量指标均在国标范围内。

表 1 测试期间两风电场各项电能质量指标测试数据及国标值

风电场		大丰 (FSIG+PMSG)	凌洋 (DFIG)	国标 限值
电压偏差	A	5.01%	6.27%	10%
	B	5.11%	6.50%	
	C	5.23%	6.13%	
长时间闪变	A	0.13	0.24	0.60
	B	0.12	0.25	
	C	0.12	0.24	
短时间闪变	A	0.13	0.27	0.80
	B	0.13	0.27	
	C	0.12	0.27	
电压总谐波畸变率	A	0.58%	0.58%	2%
	B	0.70%	0.68%	
	C	0.61%	0.63%	
三相电压不平衡度		0.17%	0.15%	2%
频率偏差		0.065 Hz	0.034 Hz	±0.2 Hz

2 风电场有功和无功测量及比较

本节基于对大丰和凌洋两风电场去年全年运行监测数据，从功率变化率、有功与无功变化关系、功率与频率变化关系，以及单机输出功率与风速变化关系四个方面对两风电场进行比较和分析。

2.1 功率变化率

根据风电场装机容量的不同，对风电场输出最大功率变化的要求也有所不同，根据 GB/Z 19963-2005，最大功率变化率包括 1 分钟功率变化率和 10 分钟功率变化率，大丰和凌洋两风电场 1 分钟功率最大变化量限值分别为 30MW 和 9.9MW，10 分钟功率最大变化量限值分别为 100MW 和 33MW，在风电场并网、正常停机以及风速增长过程中，风电场功率变化都应当满足此限制要求。图 5~图 6 分别为大丰和凌洋两风电场 1 分钟和 10 分钟最大功率变化量对比，可见两风电场最大功率变化量均低于国标限值，且 220kV 接入的大丰风电场最大功率变化量约为 110kV 接入的凌洋风电场的一半。

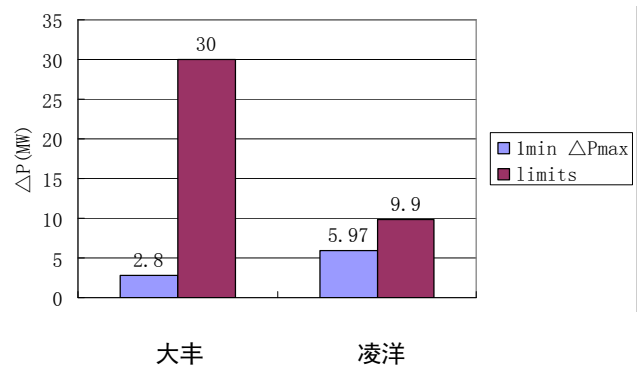


图 5 大丰和凌洋两风电场 1 分钟最大功率变化量

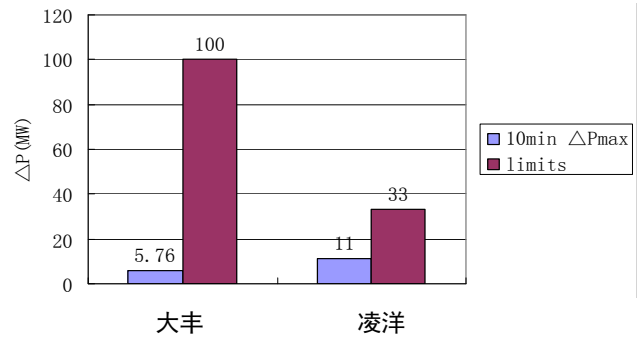


图 6 大丰和凌洋两风电场 10 分钟最大功率变化量

2.2 有功与无功变化关系

大丰和凌洋两风电场的有功和无功监测数据统计结果见图 7~图 10，图中以风电场发出功率为负，吸收功率为正。

大丰风电场部分采用恒速恒频笼型异步发电机，运行中转速基本不变，风力发电机组运行在风能转换最佳状态下的几率比较小，同时运行中需要从电网中吸收无功功率。为此于 8 月份在风电场侧 35kV 母线上安装了 6000kVar 的无功补偿装置，图 7~图 9 为无功补偿装置安装前后有功无功变化情况，可见无功补偿装置安装前，随风电场发出有功增加，吸收系统无功量同步增加；安装无功补偿装置后，消除了吸收系统无功的现象，增强了风电场侧无功控制的能力。

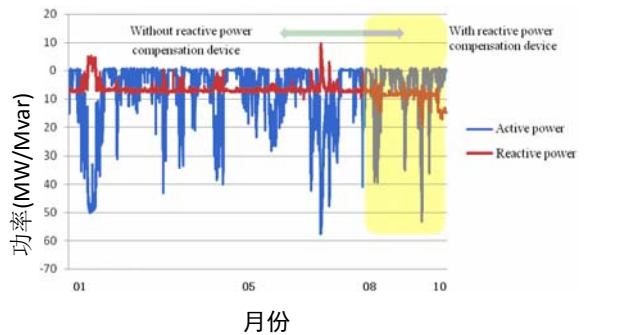


图 7 大丰风电场安装无功补偿装置前后功率变化

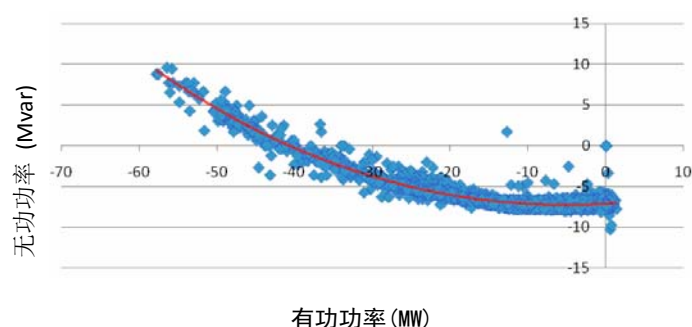


图 8 大丰风电场未安装无功补偿装置时有功和无功功率关系

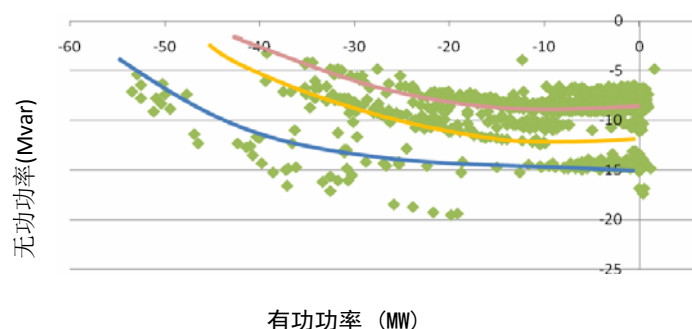


图 9 大丰风电场投入无功补偿装置后有功和无功功率关系

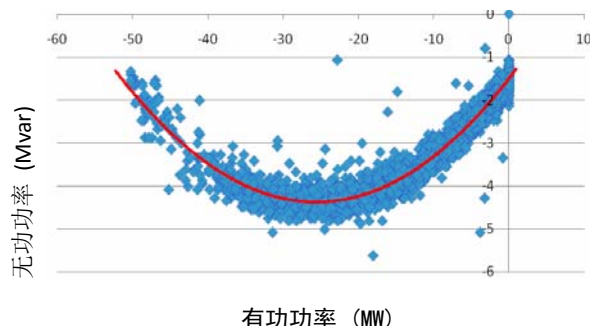


图 10 凌洋风电有功功率和无功功率关系

图 10 为凌洋风电有功无功对应关系，该风电场未安装无功补偿装置，而是通过调节机端功率因数为 0.98 来抑制从系统吸收无功现象，从图能够清楚的反映机端功率因数调节对风电场无功的控制作用，随着有功出力的增加，有效的避免了向系统吸收无功的现象，同时通过机端功率因数的调节，减少了流过线路的平均无功功率，降低了线路损耗。

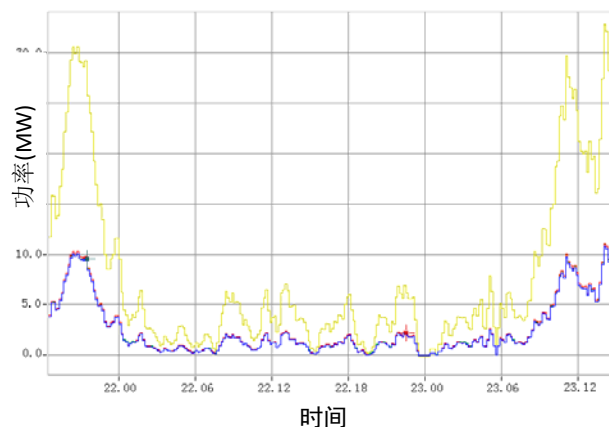
从以上两风电场功率变化图可以看出，风电场低风速无出力时，发出少量的无功，由于风电场布局不同，无功发生量也存在差别；随着出力的增大，发电机组发出的无功功率大于场内无功总消耗，向系统发出的无功也逐渐增大；当有功出力继续增加时，由于场内箱变、主变需要的无功快速增加，风力发电机组本身无法提供足够的无功支持，若风电

场未安装无功补偿且机端功率因数设定为 1，将导致风电场开始向系统吸收无功。对于电网系统末端，本身缺乏无功，风电场这种吸收无功的现象应该采取措施避免。

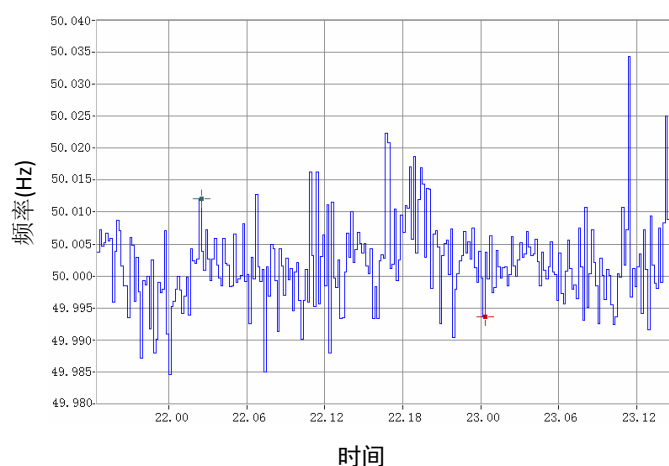
## 2.3 功率与频率变化关系

当电网中风电装机容量较大时，风力发电出力变动较大对系统频率带来影响。间歇波动的风电功率使风电场所接入系统的潮流经常处于一种重新分配的过程，除影响电压外，也在一定程度上影响系统的频率。最严重的情况是整个风电场突然切出，引起系统频率瞬时降低。频率降低的程度，与风电场装机容量占总电源容量的比例及其占总负荷容量的比例，以及风电场切出时的风速有关。

目前中国风电装机容量所占比重仍较低，对整个系统频率影响不明显，以凌洋风电场为例，图 11 为测试期间风电场有功出力和频率变化曲线，可见频率波动较小，最大偏差为 0.034 Hz，同时也观察到功率波动较大时，频率也发生较大波动。



(a) 有功功率变化曲线



(b) 频率变化曲线

图 11 凌洋风电场有功功率和频率变化曲线



## 2.4 单机输出功率与风速变化关系

风机输出功率和风速呈一定的关系,具体来讲,风机在风速大于切入风速时开始启动,输出功率与风速的 3 次方、风能利用系数和风力机桨叶的横扫面积成正比,直至风速达到额定风速时保持恒定,当风速继续增大至切出风速时,风机停止输出功率。目前江苏黄海沿海风电的切入风速在  $3.5\text{m/s} \sim 4\text{m/s}$ ,额定风速为  $12\text{m/s}$ ,切出风速为  $25\text{m/s}$ ,图 12 为凌洋风电场一台  $1.5\text{MW}$  双馈感应发电机(DFIG)风机去年全年运行数据累计,可以清楚验证风机的设计功率曲线特征。

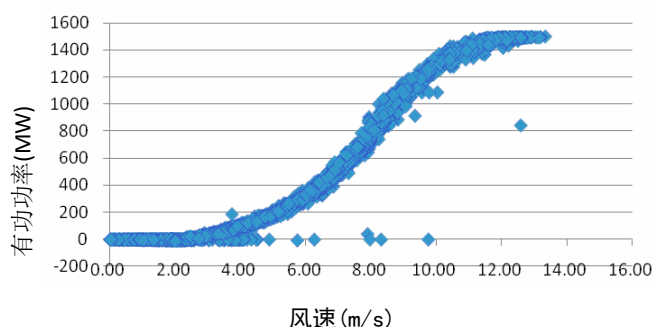


图 12 1.5MW 风机有功输出与风速变化关系

## 3 风电场低电压穿越能力仿真及比较

### 3.1 风电场低电压穿越能力要求

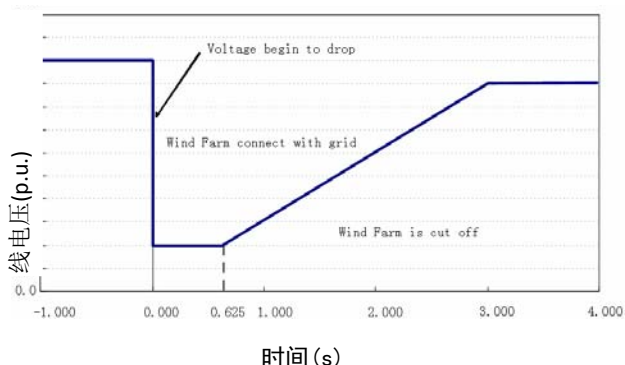


图 13 国网公司对于风电场 LVRT 的规定

为了使风力发电机组在系统故障后电压瞬间跌落时仍能保持并网,风力发电机组应具有一定的低电压穿越能力<sup>[6]</sup>。欧美等国已较早的对风力发电机组在低电压情况下运行指标提出了量化的标准<sup>[7]</sup>,要求风力发电机组在电网电压瞬间跌落期间不能随意脱离电网,而且还需要按规定向电网发送一定的无功功率,以帮助电网恢复正常运行。2009 年中国电网公司也明确规定了风电场低电压穿越能力,见图 13。考虑到我国电网结构相对薄弱,对

于风电场低电压穿越能力的规定相比欧美等国仍有一定差距,主要体现在电压最低暂降深度为 20%,高于欧美普遍采用的 15% 的标准。

### 3.2 风电场低电压穿越能力对电网的影响

当风电装机容量在电网中占有较大比重时,若风电场不具备低电压穿越能力,在系统故障后电压瞬时跌落会对电网造成严重的安全威胁,影响主要包括:

(1) 在风电装机较为密集的地区,系统故障后电压跌落导致风电大规模切机会引起潮流一定程度转移,导致电网设备过载。

(2) 在系统发生故障后,风机切除导致的无功出力减少,以致风电场向系统吸收无功,阻碍了系统电压及时恢复。

(3) 系统发生故障后,如风机全部切除,将会导致频率的严重下降。

风电场风电机具备低电压穿越能力,在电网发生电压跌落时仍能并网运行,并在故障后迅速恢复出力,将对电网的有功功率平衡提供支撑,能有效的避免以上对电网的威胁和隐患。

### 3.3 风电场低电压穿越能力仿真与比较

文献[8]可知双馈异步风电机在低电压穿越能力上要强于恒速异步风电机,对于装配恒速风电机的风电场,通过加装无功补偿装置,能够使低电压穿越能力较差的恒速异步风电机也具备一定的低电压穿越能力。

针对双馈异步风电机的优势及其广泛应用,特模拟凌洋风电场真实情况对其低电压穿越能力进行仿真分析,假设系统在高压侧母线发生三相短路故障,故障持续时间 625ms,低电压穿越实现方式为在转子电路中加撬棒电路,仿真软件为 DIGSILENT。

图 14 为系统仿真示意图,图 15~图 18 为仿真结果波形。由仿真波形可见,系统在 0.188S 时发生短路故障,母线电压瞬时跌落至 0.18p.u.,有功功率也瞬时下降至 4MW 呈缓慢衰减趋势,无功功率则瞬时增加到 28Mvar 后快速下降,转子侧过电流约有 2.7 倍。到 0.813S 时故障消失,系统电压恢复,有功功率波动后逐渐恢复正常,此时无功功率下降并经 0.2S 后恢复至 0Mvar,转子电流下降并迅速恢复正常。由此可见风电场出力在故障持续 625ms 切除后能迅速恢复正常值,实现了机组低电压穿越能

力。因转子撬棒电路是在故障清除后切除，由图 17~图 18 可见切除时转子侧电流下降幅度较大，且机组恢复到稳定前从电网吸收大量的无功功率。为此文献[9]提出了在故障清除前切除转子撬棒电路，可有效的减小向系统吸收无功，更有利于故障后风电场并网点电压的快速恢复。

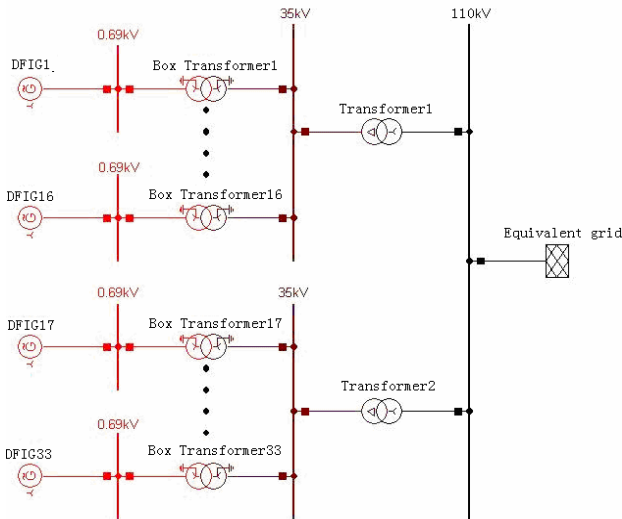


图 14 系统仿真示意图

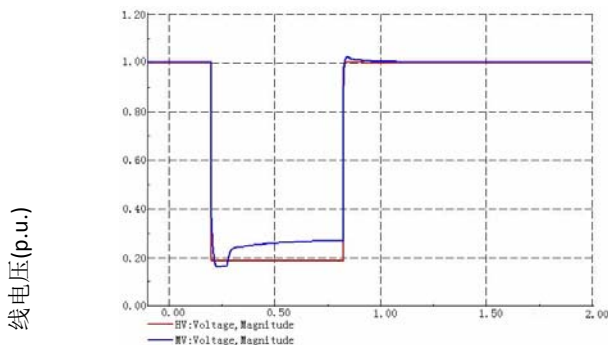


图 15 系统故障时风电场电压变化

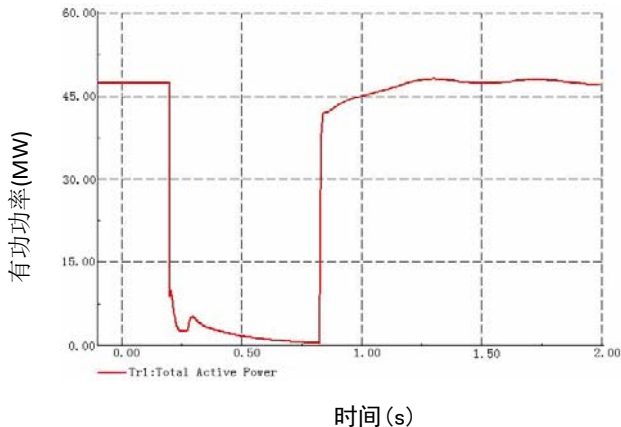


图 16 系统故障时风电场有功出力变化

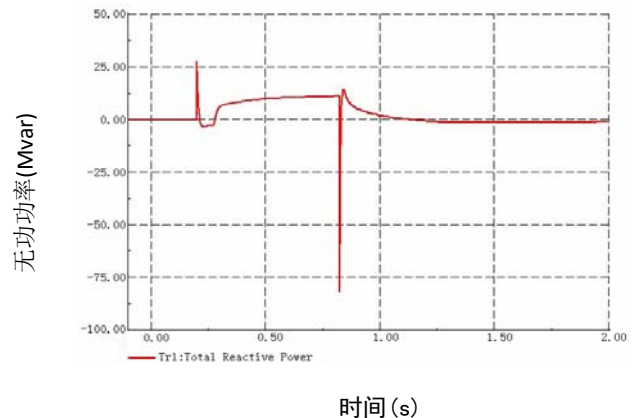


图 17 系统故障时风电场无功出力变化

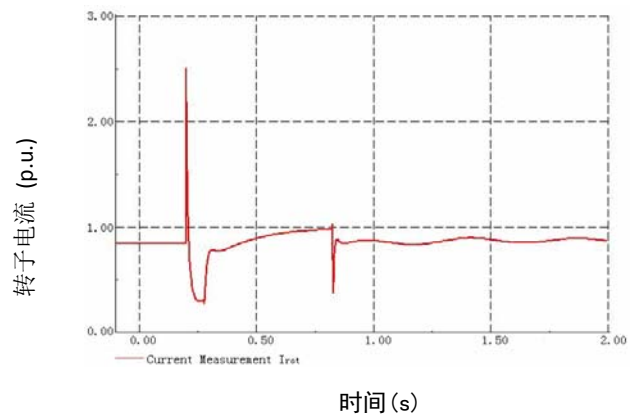


图 18 系统故障时风机转子电流变化

#### 4 结论

本文基于配备 FSIG+PMSG 和 DFIG 风机的两风电场，依据对两风电场电能质量状况实测数据以及全年在线监测数据，对配置不同类型风机且接入不同电压等级电网的风电场的电能质量、出力特性、无功补偿、LVRT 能力进行了对比性分析研究，得出了如下一些结论：

(1) 对于配置不同类型风机的风电场，电能质量已不是突出问题，各项电能质量指标均能满足标准要求。

(2) 220kV 接入的风电场谐波电流含量、电压闪变、功率变化率明显小于 110kV 接入的风电场。

(3) 异步风机在谐波注入方面明显小于双馈风机。

(4) 风电场低风速无出力时，发出少量的无功，随着出力的增大，向系统发出的无功也逐渐增大；当有功出力继续增加致风力发电机组本身无法提供风电场需求的无功支持时，将导致风电场开始向系统吸收无功。通过调节机端功率因数或增加无功补偿装置，可有效的避免了向系统吸收无功的现象，

(5)恒速异步风电机组在低电压穿越能力上要差于双馈异步风电机组。通过加装无功补偿装置,能够使低电压穿越能力较差的恒速异步风电机组也具备一定的低电压穿越能力。

#### 参考文献:

- [1] A.P.Stavros, S.Fritz. Power-quality measurements in an autonomous island grid with high wind penetration[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(1):218-224.
- [2] O.S.Mutlu, E.Akpınar, A.Balıkcı. Power quality analysis of wind farm connected to Alacatı substation in Turkey[J]. Renewable Energy, 2009, 34: 1312-1318.
- [3] E.Muljadi, C.P.Butterfield, J.Chacon, H.Romanowitz. Power Quality Aspects in a Wind Power Plant. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal,Canada.pp:8-15,Oct.,2006.
- [4] P.Sorensen, N.A.Cutululis, T.Lund. Power Quality Issues on Wind Power Installations in Denmark. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa,USA.pp:1-6,June,2007.
- [5] J.Morren, W.H.Sjoerd. D.Haan.Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J].IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2):435-441.
- [6] 曹瑞发,朱武,涂祥存,等.双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J].电网技术, 2009 (9): 72-77.
- [7] 邢文琦, 晁勤.不同风电机组的低电压穿越能力分析[J].华东电力,2008 (12) :21-25.
- [8] 魏林君,迟永宁, 赵建国,等. 双馈变速风电机组低电压穿越控制[J].电网与清洁能源, 2009 (2) :41-45.