

双馈式风电场暂态电压控制系统及其 RTDS 试验

李少华¹, 张爱玲¹, 张崇见², 郝正航^{2,3}, 张望¹, 柴建云³, 姚致清¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 为了提高双馈式风电场的暂态电压支撑能力, 提出了风电场暂态无功附加控制方案。通过理论分析得出以下结论: 强电网条件下, 依靠风机自身无功支撑暂态电压跌落, 会引起转子电流显著增长; 而在弱电网条件下, 风电场发出暂态无功不仅有利于抑制暂态电压跌落, 而且转子励磁电流的增长也是可以接受的。为了实施所提方案, 制作了由工控机、现场总线和光纤设备构成的试验样机, 并在实时数字仿真器上进行了闭环试验。试验结果证明了理论分析的正确性。

关键词: 风电场; 电压控制; RTDS; 弱电网; 试验

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.023

0 引言

“弱支撑性”是双馈式风电场区别于常规电厂的重要特点, 也是其固有缺点^[1]。“弱支撑性”表现在: 当电网受扰或发生短路故障时, 风电场难以快速提供无功支持和缺乏暂态电压控制能力。大规模双馈式风电场暂态无功及电压控制能力的缺失给电网运行带来较大隐患, 同时对风电场自身安全运行也非常不利。为此, 国内外风电并网相关规定都要求在电网故障及电压跌落期间, 风电机组应发出动态无功以支撑电网电压^[2-3]。然而, 双馈风电机组(群)发挥暂态电压支撑能力尚有较多实际问题需要解决。

文献[4]研究了单台机组的暂态电压和无功调节, 将风电场暂态无功电压控制模型简化为单机模型并进行了原理性研究, 证实了暂态无功电压控制的可行性。文献[5]提出了风电场二次电压控制方法来控制区域内主导节点的电压, 但没有解决远程信号的分布式控制问题。文献[6]提出了双馈型风电场对当地用户进行就近无功补偿的策略, 并给出相应的无功分配策略, 包括风电场各风机之间以及单台风电机组定子和网侧变换器之间的无功分配原则, 充分发挥风电场的无功处理能力, 使其参与所连电网的无功调节, 但没有考虑分布式控制的时滞问题。文献[7]将双馈电机励磁电流平均分配到定子和转子, 使网侧与转子侧变流器容量相等, 实现变流器容量优化配置, 并对双馈电机的无功调节能力和对接入系统的电压控制作用进行了探讨, 提出了不同

系统运行状况下的无功选择办法。文献[8]提出了双馈风机与风电场升压站集中补偿设备协调控制策略, 可以在较小静态补偿设备投资的前提下实现并网点母线电压/无功的连续调节。

此外, 在风电机组和风电场电压/无功调节及故障穿越问题上, 国内学者从多个角度提出了各种控制策略和可行方案: 文献[9-10]提出了改进的励磁控制策略可提高电网电压跌落下的不间断运行能力; 文献[11-13]则认为双馈型风电场具有发出无功的潜力并提出了协调或优化协调或优化控制方案; 文献[14]提出变频器容量和保护等值对连锁脱网有很大影响; 文献[15]强调了电网故障时风电场电压/无功协调控制的重要性并提出了一种无功补偿方案; 文献[16]基于双馈风机功角概念, 研究了抵御电压跌落的暂态控制方法; 文献[17-18]研究了永磁直驱风机的低压穿越特性, 提出了保护措施和支持电网恢复的控制策略。

以往研究肯定了挖掘风电机组暂态无功的可能性, 但将这一想法付诸实施, 尚有以下问题需要研究: 风电机组产生无功的时间常数在什么范围, 能否满足暂态支撑所需的快速性; 风机群在支撑电网暂态电压时, 其转子电流是否过载, 风机付出的代价可否承受; 数百台风机分散在方圆几十千米的区域, 控制对象空间分散, 在暂态时间尺度下如何保证闭环控制所需要的通信实时性。本文通过理论分析和样机试验初步回答了上述问题。

1 双馈风机无功调节的快速性分析

1.1 双馈风机的数学模型

根据双馈感应发电机(DFIG)广义派克方程, 以定子磁链(ψ_{ds}, ψ_{qs})和转子电流(i_{dr}, i_{qr})为状态变量时, dq 坐标系下的状态方程为^[16]:

收稿日期: 2013-09-24; 修回日期: 2014-07-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51267003); 中国博士后科学基金资助项目(2013M531678); 许继电气股份有限公司资助项目(2012)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51267003), China Postdoctoral Fund(2013M531678) and XJ Electric Corporation Fund(2012)

$$\begin{cases} p\psi_{ds} = -\frac{R_s}{L_s}\psi_{ds} + L''R_s i_{dr} + \omega_1\psi_{qs} \\ p\psi_{qs} = -\frac{R_s}{L_s}\psi_{qs} + L''R_s i_{qr} - \omega_1\psi_{ds} + u_{qs} \\ pL'i_{dr} = -R_r i_{dr} + u_{dr} + \omega_s L' i_{qr} + \omega_s L''\psi_{qs} - L''p\psi_{ds} \\ pL'i_{qr} = -R_r i_{qr} + u_{qr} - \omega_s L' i_{dr} - \omega_s L''\psi_{ds} - L''p\psi_{qs} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $L' = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}$, $L'' = \frac{L_m}{L_s}$, L_s 、 L_r 和 L_m 分别是定、转子自感和互感; R_s 、 R_r 分别是定、转子电阻; ω_1 和 ω_s 分别是同步转速和转差; u_{dr} 、 u_{qr} 分别是励磁电压 d 、 q 轴分量; u_{qs} 是定子电压; p 是微分算子。

1.2 暂态无功调节的时间常数

能否快速发出无功决定了双馈式风电场是否具备暂态电压调节能力。因此, 考察双馈风机无功响应的快速性是必要的。

令 $u_{dr}^* = u_{dr} + \omega_s L' i_{qr} + \omega_s L'' \psi_{qs} - L'' p \psi_{ds}$, $u_{qr}^* = u_{qr} - \omega_s L' i_{dr} - \omega_s L'' \psi_{ds} - L'' p \psi_{qs}$, 则式(1)中的转子电流状态方程可表示为:

$$\begin{cases} pL'i_{dr} = -R_r i_{dr} + u_{dr}^* \\ pL'i_{qr} = -R_r i_{qr} + u_{qr}^* \end{cases} \quad (2)$$

设定子电压矢量在定向坐标系的 q 轴上, 忽略网络电磁暂态时, 双馈风机定子无功和有功可表示为^[3]:

$$\begin{cases} Q_s = 3[u_{qs} L_m i_{dr} / L_s - u_{qs}^2 / (\omega_1 L_s)] / 2 \\ P_s = 3u_{qs} L_m i_{qr} / (2L_s) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, 定子绕组的无功功率 Q_s 可由转子电流 i_{dr} 控制, 而 i_{dr} 由 d 轴励磁电压 u_{dr}^* 控制, 其时间常数 $\tau = L' / R_r$ 。 τ 的范围一般为 8~15 ms。

根据以上分析, 双馈风机定子绕组的无功调节具有毫秒级的快速性, 几乎等同于静止同步补偿器 (STATCOM) 的快速无功输出特性。如果整个风电场的数百台风机在统一控制指令下快调无功, 那么就相当于在风电场公共母线上接入了一台大容量的“虚拟 STATCOM”。这台“虚拟 STATCOM”对风电场公共母线的暂态电压调节能力具有不可低估的作用。

2 暂态无功支撑的代价分析

在电网电压跌落期间, 由双馈风机发出无功来支撑电网电压, 这种做法的代价是提供所需的转子电流。如果在支撑电网电压时造成转子过电流并导致励磁变频器损坏, 将不可实施。

一般认为, 增大无功是以显著增大转子电流为代价的, 会需要很大的励磁变频器容量。事实上, 对于弱电网接入风电的情形, 这种认识不是十分准确, 需要分不同情形深入讨论。

2.1 风电场接入强电网

为突出主要问题, 将风电场等值为一台风机, 如图 1 所示。 B_1 是风电场并网点, B_2 是无穷大母线, X_s 为输电系统总电抗 (即 B_1 处的戴维南电抗), X_s 的大

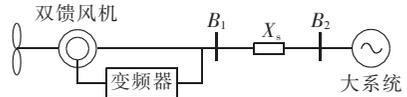


图 1 风电场并网系统接线图

Fig.1 Wiring diagram of grid-connected wind farm

小反映了 B_1 处的电网强弱。

所谓强电网, 是指母线 B_1 处的系统内抗 X_s 很小, 或者说 B_1 短路容量非常大。对于这种情形, B_1 电压 u_{qs} 几乎不受注入无功的影响。由式(3)得:

$$\begin{cases} i_{dr} = [2Q_s L_s / (3u_{qs}) + u_{qs} / \omega_1] / L_m \\ i_{qr} = 2P_s L_s / (3u_{qs} L_m) \\ i_r = \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可见, i_{dr} 与 Q_s 是线性关系, 若增发无功, 则 i_{dr} 增加; 由于 u_{qs} 基本不变, i_{qr} 正比于 P_s 。于是得出如下结论: 在一定的 P_s 下, 若增发无功 Q_s , 则 i_{dr} 线性增加, i_{qr} 不变, 全电流 i_r 按非线性规律单调增加, 反之亦然。强电网条件下定子无功与转子电流 (均为标幺值) 的关系如图 2 所示。

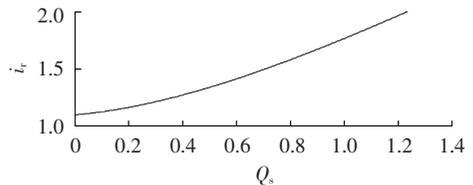


图 2 强电网条件下定子无功与转子电流的关系

Fig.2 Relationship between stator reactive power and rotor current under strong grid condition

2.2 风电场接入弱电网

所谓弱电网, 是指 X_s 较大, 或者说 B_1 的短路容量较小。对于这种情形, B_1 的电压 u_{qs} 受注入无功 Q_s 的影响, 二者关系可近似表示为:

$$u_{qs} = u_{qs0} + Q_s X_s / u_{qs0} \quad (5)$$

其中, u_{qs0} 是注入无功之前的机端电压。将式(5)代入式(4)得:

$$\begin{cases} i_{dr} = 2Q_s L_s / [3(u_{qs0} + Q_s X_s / u_{qs0})] + \\ (u_{qs0} + Q_s X_s / u_{qs0}) / (\omega_s L_m) \\ i_{qr} = 2P_s L_s / [3L_m(u_{qs0} + Q_s X_s / u_{qs0})] \\ i_r = \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2} \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可见, 若增大 Q_s , 则 u_{qs} 增大, 同时 i_{qr} 减小, 即对于弱电网而言, 无功电流的注入可使母线电压显著升高, 从而有功电流得以减小。由于励磁全电流由有功分量和无功分量组成, 有功分量和无功分量此消彼长的结果使全电流变化规律较为复杂。区分并网点强弱不同, 基于式(6)可得到定子无功功率与转子电流 (均为标幺值) 的对应关系如图 3 所示。

由图 3 看出, 对于弱电网 ($X_s = 0.1$ p.u.) 而言, 当增发无功不太大时, 转子电流是下降的, 当无功较大

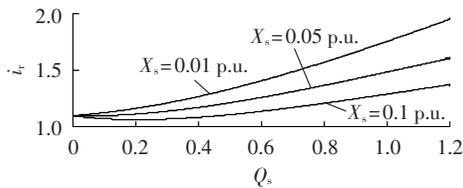


图 3 弱电网条件下定子无功与转子电流的关系

Fig.3 Relationship between stator reactive power and rotor current under weak grid condition

时,转子电流仍然是上升趋势,但上升速率较小。可见,增发无功引起的转子变频器过流风险不大。但是,随着电网由弱变强($X_s=0.05$ p.u.和 $X_s=0.01$ p.u.),无功的增加引起了转子电流单调上升,而且上升速率较大,可见增发无功显著增大了转子变频器过流风险。由本节分析得出:并入弱电网时,依靠双馈风机群自身无功能力调节并网电压是必要的。

3 分布式通信时滞问题

3.1 风电场暂态电压控制的 2 种方案

根据反馈信号的位置不同,风电场暂态电压控制系统有 2 种备选方案:方案 1 是反馈信号为每台风机的机端电压,即单机就地控制方案,如图 4(a)所示;方案 2 是反馈信号为风电场公共母线,即机群广域控制方案,如图 4(b)所示。

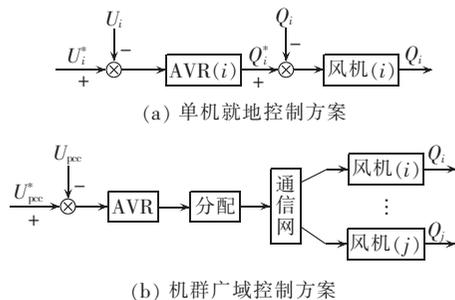


图 4 风电场暂态电压控制的 2 种方案

Fig.4 Two schemes of wind farm transient voltage control

对于方案 1,实质上是将常规同步电机的自动电压调节器(AVR)控制结构直接移植于风机。不难分析,同步电机普遍采用的 AVR 用在每一台风机上是不恰当的。每台风机的容量仅有几兆瓦,相对于其接入的电网,单台风机容量很小,AVR 参数整定和接入的系统环境有关。以调节机端电压为目标的 AVR 是难以实现的。对于风机制造商而言,不可能考虑到风机应用中千差万别的接入环境和模式,一般只将风机作为 PQ 节点。如果实施了 AVR 控制,AVR 的参数调试将变得异常困难。一个数百台风机的风电场,需要逐台调试参数,而且调试过程中不同风机之间还会相互影响,故实际当中方案 1 几乎无法实施。

对于方案 2,是将风电场的数十乃至数百台风机作为一个整体统一调节,只有一台集中控制器,控制

器只发出附加控制信号,不改变风机原有 PQ 节点的性质。由于风电场总的无功容量可达数百兆乏,该无功容量可以有效调节风电场公共母线电压。但是,方案 2 的关键问题是将统一的无功指令通过串行通信发送至每台风机。AVR 至最远风机的空间距离可能达到 20 km 左右,对于暂态电压调节而言,控制指令的滞后可能使控制作用完全失效。因此,通信网的时滞问题是技术关键。此外,集中控制器在分配给每一台风机无功出力时,先由电压偏差计算出总的无功需求,再根据各台风机运行工况和变流器容量限额实时计算各台风机无功附加控制量并通过总线下发。

3.2 通信网的时滞分析

对于机群控制系统采用主从式结构,通信方式有 2 种选择:方式 1 为采用一对多发送;方式 2 为采用一对多全局广播。对于方式 1,由于所有风机(按 200 台计)都是从机,每一控制周期需要发送 200 次报文。对于方式 2,所有风机接受相同的报文,每一控制周期只需发送一次报文。

点对点的报文传输时间分析如下:假设报文长度为 200 bit,串行通信波特率为 500 kbit/s,则可计算得到一次报文的传输时间约为 0.4 ms。当采用光纤通信长距离传输时,光电转换的协议解析时间大约为 0.5 ms,故长距离光纤传输的时间延迟约为 1 ms。因此,当采用方式 1 时,每一控制周期的延时为 200 ms;采用方式 2 时,每一控制周期的延时为 1 ms,1 ms 通信延时不会对闭环控制系统造成明显影响。故采用方式 2。

4 基于 RTDS 的试验研究

为了面向实际应用,将本文提出的风电场暂态电压控制系统做成试验样机。该试验样机包括 1 台工控机,用于测量和监视风电场状态变量;1 块 DSP 控制板,用于暂态电压控制算法实现;6 块 CAN 总线模块,用于构成 CAN 总线通信网络;6 块光电转换器和 5 km 的单模光纤,用于实现光电协议转换及光纤通信。

作为控制对象的风电场,由 50 台 1.5 MW 双馈风机组成,在 110 kV 变电站汇集后,通过较长线路和大电网连接,该算例系统用实时数字仿真器(RTDS)建模并与试验样机连接构成闭环控制系统,如图 5 所示。RTDS 的硬件配置如下:整个模型使用了 2 个 RACK 共 12 块处理器(PB5)、1 块 12 通道模拟量输入卡(GTAI)和 1 块 12 通道模拟量输出卡(GTAO)。RTDS 为实时仿真设备,在建模时要考虑硬件资源的分配问题,将 8 块 PB5 分配给全部双馈发电机组,其余 4 块用于计算控制系统模型、同步发电机模型以及电网元件模型。

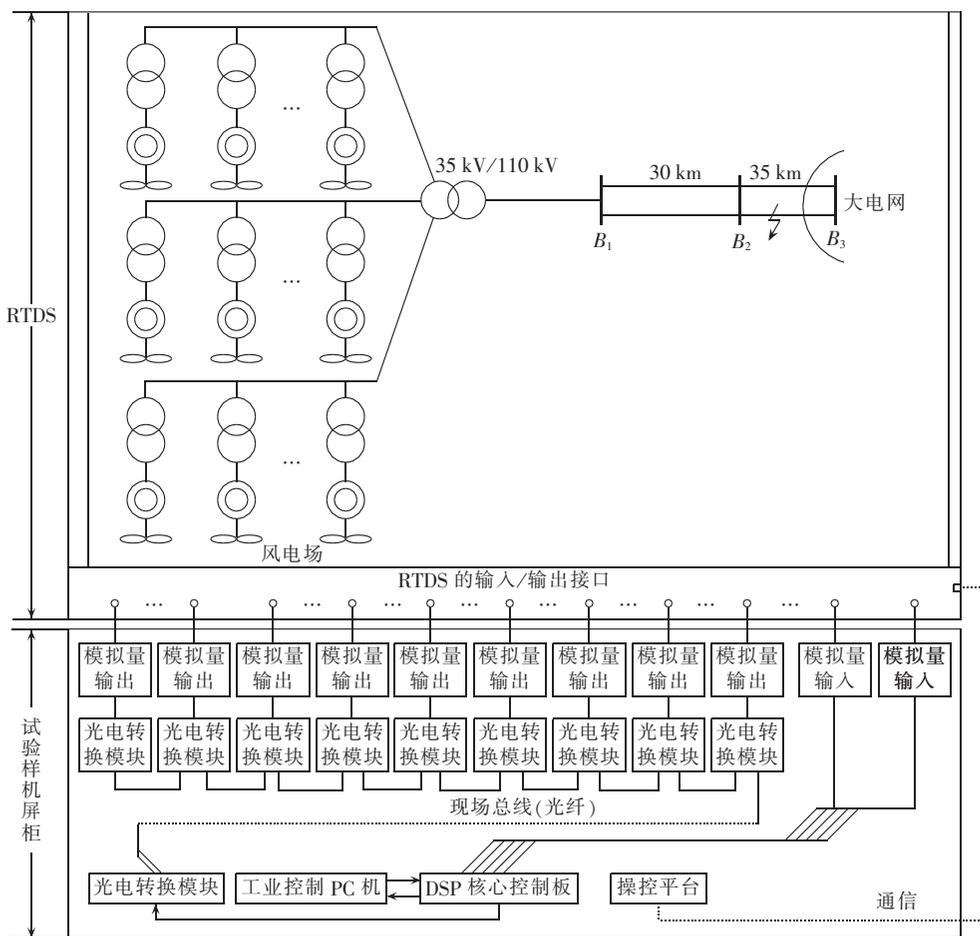


图 5 基于 RTDS 的风电场闭环试验接线图

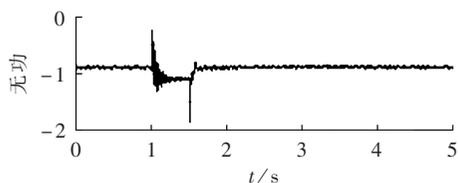
Fig.5 Connection diagram of RTDS-based close-loop test for wind farm

试验样机与 RTDS 的连接关系是: DSP 控制板的 AD 转换通道与 RTDS 的 GTA0 卡相连, 将风电场的母线 B_1 电压输出给试验样机, 试验样机产生的控制量经过基于光纤的现场总线模块转换为光信号, 经单模光纤传输后再转换为电信号和 RTDS 的 GTA1 相连接, GTA1 将信号输出给 RTDS 中的风电场, 从而构成闭环控制系统。

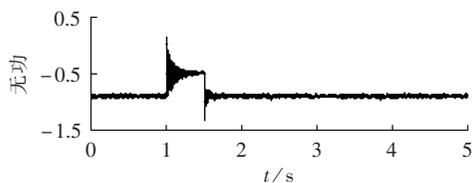
暂态试验条件为: 外部电网在 $t=1.0$ s 时发生三相短路故障(见图 5), $t=1.5$ s 时故障清除。为了检验试验样机的控制效果, 按试验样机投入和不投入 2 种情形进行对比。通过 RTDS 监控软件测量其中一台风机(其余风机类似)的无功及风电场母线电压的暂态响应。

图 6 是双馈风机的无功响应(标么值)。在样机投入前, 双馈风机无功输出略有下降; 在样机投入后, 双馈风机能及时收到远方无功指令并迅速调节无功电流从而增发无功。试验结果证实了第 1 节所述的双馈风机无功响应的快速性以及第 3.2 节所述的通信时滞没有对闭环控制造成明显影响。

图 7 是风电场母线 B_1 电压(标么值)的暂态响应。由于所有风机在电网故障后都迅速增发无功, 使



(a) 样机未投入



(b) 样机投入

图 6 双馈风机无功响应

Fig.6 Reactive power response of doubly-fed wind turbine

得 B_1 电压跌落程度变小, 样机未投入时电压跌落至 0.72 p.u., 投入样机后电压跌落至 0.81 p.u. 可见, 本文所研制的试验样机可以使风电场在一定程度上支撑公共连接点母线电压。

图 8 是双馈风机转子电流的暂态响应。电网故障导致了风机转子电流的增加, 在样机投入和未投入 2 种情形下, 转子电流的暂态响应差别不大, 该试

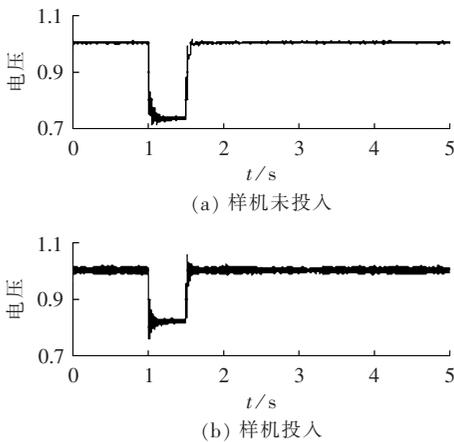


图7 双馈风机机端电压响应

Fig.7 Voltage response of doubly-fed wind turbine

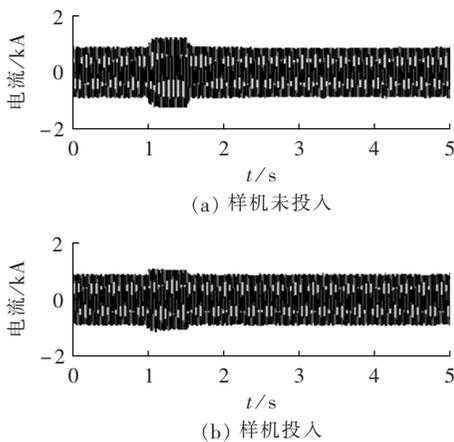


图8 双馈风机转子电流暂态响应

Fig.8 Rotor transient current response of doubly-fed wind turbine

验结果和图3的理论分析曲线是一致的,说明弱电网条件下该试验样机在支撑电网的同时没有额外增加风机转子变频器的负担。

5 结论

本文研究得出以下结论:

- 双馈风机动态无功响应时间常数很小,具有快速发出无功的能力;
- 风电场并入弱电网时,风机群有必要挖掘自身无功,减小电网暂态电压跌落幅度;
- 通过RTDS平台验证,基于广域光纤通信网构成的机群暂态无功闭环控制系统,可以在转子电流代价可接受的条件下,缓解弱电网电压跌落。

参考文献:

[1] 袁小明. 长线路弱电网情况下大型风电场的联网技术[J]. 电工技术学报,2007,22(7):29-36.
YUAN Xiaoming. Integrating large wind farms into weak power grids with long transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(7):29-36.
[2] 雷亚洲,GORDON L. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电

网技术,2005,25(12):27-31.

- LEI Yazhou,GORDON L. An introduction on wind power grid code and dynamic simulation [J]. Power System Technology, 2005,25(12):27-31.
- [3] 迟永宁,王伟胜,戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(25):25-32.
CHI Yongning,WANG Weisheng,DAI Huizhu. Study on transient voltage stability enhancement of grid-connected wind farm with doubly fed induction generator installations[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(25):25-32.
- [4] EL M M,JOOS G,ABBEY C. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(3):1178-1190.
- [5] 郎永强,张学广,徐殿国,等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(9):77-82.
LANG Yongqiang,ZHANG Xueguang,XU Dianguo,et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(9):77-82.
- [6] 贾俊川,刘晋,张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. 中国电机工程学报,2010,30(30):87-92.
JIA Junchuan,LIU Jin,ZHANG Yigong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(30):87-92.
- [7] 乔颖,鲁宗相,徐飞. 双馈风电场自动电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2010,34(5):96-101.
QIAO Ying,LU Zongxiang,XU Fei. Coordinative strategy for automatic voltage control of wind farms with doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(5):96-101.
- [8] 王勇,张纯江,柴秀慧,等. 电网电压跌落情况下双馈风力发电机电磁过渡过程及控制策略[J]. 电工技术学报,2011,26(12):14-19.
WANG Yong,ZHANG Chunjiang,CHAI Xiuhui,et al. Electromagnetic transient process and control strategy for doubly-fed wind power generator under grid voltage dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(12):14-19.
- [9] 姚骏,廖勇,唐建平. 电网短路故障时交流励磁风力发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(30):64-71.
YAO Jun,LIAO Yong,TANG Jianping. Ride-through control strategy of AC excited wind-power generator for grid short-circuit fault[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(30):64-71.
- [10] 刘其辉,王志明. 双馈式变速恒频风力发电机的无功功率机制及特性研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(3):33-38.
LIU Qihui,WANG Zhiming. Reactive power generation mechanism & characteristic of doubly fed variable speed constant frequency wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(3):33-38.
- [11] 袁晓冬,邱志鹏,李群,等. 双馈型风电机组网侧换流器无功功率调节控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):16-19.
YUAN Xiaodong,LIU Zhipeng,LI Qun,et al. Reactive power regulation strategy for grid-side converter of doubly-fed induction generator in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):16-19.

- [12] 李国庆,王鹤,李鸿鹏. 微电网中双馈感应风力发电系统控制方法研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):1-7.
LI Guoqing,WANG He,LI Hongpeng. Control strategy for DFIG-based wind farm in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):1-7.
- [13] 段建东,杨杉. 基于改进差分进化法的含双馈型风电场的配电网无功优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):123-127.
DUAN Jiandong,YANG Shan. Reactive power optimization based on modified differential evolution algorithm for power distribution system with DFIG wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):123-127.
- [14] 王成福,梁军,冯江霞,等. 故障时刻风电系统无功电压协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):14-21.
WANG Chengfu,LIANG Jun,FENG Jiangxia,et al. Coordinated var-voltage control during fault of wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):14-21.
- [15] 李建林,胡书举,孔德国,等. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(19):92-95.
LI Jianlin,HU Shuju,KONG Deguo,et al. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(19):92-95.
- [16] 郝正航,余贻鑫,曾沅. 双馈风力发电机功角暂态行为及其控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):79-83.
HAO Zhenghang,YU Yixin,ZENG Yuan. Transient performance of DFIG power angle in wind farm and its control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):79-83.
- [17] 廖勇,何金波,姚骏,等. 基于变桨距和转矩动态控制的直驱永

磁同步风力发电机功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(18):71-77.

LIAO Yong,HE Jinbo,YAO Jun,et al. Power smoothing control strategy of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(18):71-77.

[18] 张坤,毛承雄,陆继明,等. 基于储能的直驱风力发电系统的功率控制[J]. 电工技术学报,2011,26(7):7-14.

ZHANG Kun,MAO Chengxiong,LU Jiming,et al. Power control strategy of directly driven wind turbine with energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(7):7-14.

作者简介:



李少华

李少华(1982-),男,湖南衡阳人,工程师,博士研究生,主要研究方向为柔性输电、特高压直流输电等(E-mail:lishaohua@xjgc.sggc.com.cn)

张爱玲(1968-),女,河南周口人,教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统保护与控制、特高压直流输电等;

张崇见(1968-),男,宁夏银川人,高级工程师,博士,博士后,主要研究方向为智能调度系统、配电网规划、新能源与电动汽车、智慧城市等;

郝正航(1972-),男,河南开封人,教授,博士,博士后,通讯作者,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、智能电网、风力发电等(E-mail:haozhenghang@163.com)。

Transient voltage control system and RTDS test for doubly-fed wind farm

LI Shaohua¹,ZHANG Ailing¹,ZHANG Chongjian²,HAO Zhenghang^{2,3},
ZHANG Wang¹,CHAI Jianyun³,YAO Zhiqing¹

(1. XJ Electric Corporation,Xuchang 461000,China;2. XJ Group Corporation,Xuchang 461000,China;

3. Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: In order to enhance the grid-voltage support ability of DFIG(Doubly fed Induction Generator) wind farm,a strategy of the additional transient reactive power control of wind farm is presented. Theoretical analysis points out that:when connected with a strong power grid,the transient voltage support by the reactive power of wind turbines will result in the obvious increase of rotor current;when connected with a weak power grid,the reactive power generated by wind farm may suppress the transient voltage sag while the rotor exciting current increase is tolerable. For implementing the control strategy,a prototype composed of industry computer,field bus and fiber-optical is designed and the closed-loop test is conducted based on RTDS. Results validate the correctness of theoretical analysis.

Key words: wind farms; voltage control; RTDS; weak power grid; testing