

DOI: 10.7667/PSPC152149

# 基于双馈风电机组的分布式动态无功支撑系统

黄弘扬<sup>1</sup>, 王波<sup>2</sup>, 黄晓明<sup>1</sup>, 楼伯良<sup>1</sup>, 卓谷颖<sup>1</sup>, 华文<sup>1</sup>, 吴跨宇<sup>1</sup>

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;

2. 国网浙江省电力公司宁波供电公司, 浙江 宁波 310007)

**摘要:** 充分挖掘风电机组的无功电压调节能力对改善电力系统的电压稳定性有重要意义。首先定量分析了实际商用双馈风电机组的无功调节能力及限制因素, 指出双馈风电机组具备较强的无功功率输出和吸收能力。继而提出了一种利用双馈风电机组的电力系统分布式动态无功支撑系统的构想及其实现方案。该系统可充分发挥双馈风电机组的动态无功调节能力, 有效提高电力系统的动态无功储备, 并显著改善双馈风电机组接入电网的电压稳定性。实际浙江电网的仿真结果验证了该技术的可行性和有效性。

**关键词:** 风力发电; 双馈风电机组; 无功功率; 电压稳定; 分布式动态无功支撑

## Distributed dynamic reactive power support system based on doubly fed induction generator

HUANG Hongyang<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, HUANG Xiaoming<sup>1</sup>, LOU Boliang<sup>1</sup>, ZHUO Guying<sup>1</sup>, HUA Wen<sup>1</sup>, WU Kuayu<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310014, China;

2. Ningbo Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Ningbo 310007, China)

**Abstract:** The reactive power control of the doubly fed induction generator plays an important role in improving power system voltage stability. Firstly, the reactive power capability of the commercial doubly fed induction generator and its limitations are analyzed. It is pointed out that the doubly fed induction generator has a strong reactive power output and absorption capability. On this basis, a distributed dynamic reactive power support system based on the doubly fed induction generator is proposed. The dynamic reactive power capability of the doubly fed induction generator can be fully explored by the proposed system. As a result, the dynamic reactive power reserve is increased and the power system voltage stability is improved. Finally, the simulation results of Zhejiang Power Grid validate the effectiveness of the proposed technique.

**Key words:** wind power generation; doubly fed induction generator; reactive power; voltage stability; distributed dynamic reactive power support

## 0 引言

双馈感应风力发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)是风力发电的主流机型<sup>[1-5]</sup>。如何提高DFIG的故障穿越能力、辅助频率调节能力和无功电压调节能力, 以及如何改善大规模风电接入电网的安全稳定特性, 是目前亟待解决的关键问题<sup>[6-10]</sup>。

针对DFIG风电场的无功电压控制问题已有大量研究。文献[11-12]从机组热稳定性和静态稳定性角度分析DFIG的无功功率调节能力极限。文献[13-18]利用DFIG无功功率调节能力, 提出风电场参与电力系统无功电压控制的基本方法和优化策

略。文献[19]在此基础上提出DFIG风电场的高压侧电压控制策略。文献[20]针对电网电压不平衡问题提出DFIG风电场负序电压控制策略。在风电场内部无功补偿设备协调控制方面, 文献[21]提出DFIG和静止同步补偿器(Static synchronous COMPensator, STATCOM)的协调控制策略, 以平抑风电场的无功波动。文献[22-23]提出DFIG和静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)的协调控制策略, 以提高机组无功电压裕度、解决风电场的二次跳机问题。

本文首先分析了实际商用双馈风电机组的无功调节能力及限制因素, 继而提出了利用DFIG作为电力系统分布式动态无功支撑系统的构想。在此基础上, 进一步提出一种DFIG风电场动态无功支

撑系统, 可充分发挥 DFIG 无功调节能力, 同时又能避免 DFIG 机端电压越限。最后, 通过仿真算例验证了前述技术在解决实际电网无功电压问题方面的有效性。

## 1 DFIG 系统的无功功率调节能力

### 1.1 DFIG 系统的基本结构

DFIG 系统结构与潮流分布如图 1 所示。图中:  $P_s$  和  $Q_s$  为 DFIG 定子侧的有功和无功功率;  $P_r$  和  $Q_r$  为 DFIG 转子侧的有功和无功功率;  $P_g$  和  $Q_g$  为 DFIG 网侧变流器的有功和无功功率;  $P_t$  和  $Q_t$  为 DFIG 系统输出的总有功和无功功率。

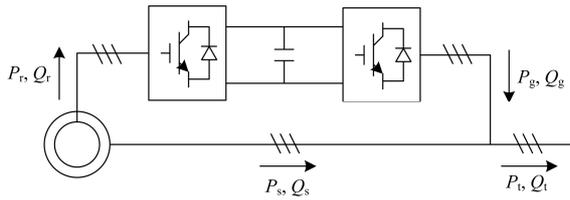


图 1 DFIG 系统结构图

Fig. 1 Structure of DFIG system

由图 1 可知:

$$P_t = P_s + P_g \quad (1)$$

$$Q_t = Q_s + Q_g \quad (2)$$

忽略损耗的条件下, DFIG 系统各有功功率间存在如下关系。

$$P_s = P_t / (1 + s) \quad (3)$$

$$P_g = sP_t / (1 + s) \quad (4)$$

式中,  $s$  为 DFIG 转差率。

### 1.2 DFIG 定子侧的无功功率调节能力

DFIG 系统的定子绕组和网侧变流器均具备无功功率调节能力。DFIG 定子侧功率的运行范围受定子绕组、转子绕组以及转子侧变流器的电流限值约束。DFIG 定子电流  $I_s$  和转子电流  $I_r$  可写成<sup>[19]</sup>

$$I_s = \sqrt{\left(\frac{P_s}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{Q_s}{U_s}\right)^2} \quad (5)$$

$$I_r = \sqrt{\left(\frac{X_s}{X_m} \frac{P_s}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{U_s}{X_m} + \frac{X_s}{X_m} \frac{Q_s}{U_s}\right)^2} \quad (6)$$

式中:  $X_s$  和  $X_m$  为 DFIG 的定子电抗和励磁电抗;  $U_s$  为 DFIG 机端电压。

由式(5)可知, 在定子绕组电流限值  $I_{s,max}$  的限制下, 定子侧无功功率  $Q_s$  的运行范围为

$$Q_{s,min1} \leq Q_s \leq Q_{s,max1} \quad (7)$$

其中:

$$Q_{s,max1} = +\sqrt{U_s^2 I_{s,max}^2 - P_s^2} \quad (8)$$

$$Q_{s,min1} = -\sqrt{U_s^2 I_{s,max}^2 - P_s^2} \quad (9)$$

由式(6)可知, 在转子绕组和转子侧变流器电流限值  $I_{r,max}$  ( $I_{r,max}$  为两者中的较小值)的限制下, 定子侧无功功率  $Q_s$  的运行范围为

$$Q_{s,min2} \leq Q_s \leq Q_{s,max2} \quad (10)$$

其中:

$$Q_{s,max2} = -\frac{U_s^2}{X_s} + \sqrt{\left(U_s \frac{X_m}{X_s} I_{r,max}\right)^2 - P_s^2} \quad (11)$$

$$Q_{s,min2} = -\frac{U_s^2}{X_s} - \sqrt{\left(U_s \frac{X_m}{X_s} I_{r,max}\right)^2 - P_s^2} \quad (12)$$

DFIG 定子侧无功功率  $Q_s$  同时受到式(7)和式(10)的约束。式(8)~式(12)表明, DFIG 定子侧无功功率调节能力不仅受定子绕组、转子绕组和转子侧变流器电流限值约束, 而且还与 DFIG 机组定子电抗和励磁电抗参数、机端电压以及定子侧有功功率有关。

以附录中浙江某风电场 1.5 MW 商用 DFIG 机组为例, 图 2 根据式(7)至式(12)给出了额定机端电压下 DFIG 定子侧无功功率的运行范围。图中: 定子绕组电流限值约束曲线与转子绕组和转子侧变流器电流限值约束曲线间阴影区域为定子侧无功功率的允许运行范围。从图 2 可以得出以下结论。

(1) DFIG 定子侧的无功功率输出能力主要受转子绕组电流限值约束, 无功功率吸收能力主要受定子绕组电流限值约束。

(2) DFIG 定子侧输出和吸收无功功率的能力是不对称的, 无功吸收能力强于无功输出能力。

(3) 额定机端电压下, DFIG 定子侧最大无功输出能力随有功功率变化在 0~1.0 Mvar(对应于 0~77%的定子侧额定容量)范围内变化。

(4) 额定机端电压下, DFIG 定子侧最大无功吸收能力随有功功率变化在 0~1.3 Mvar(对应于 0~100%的定子侧额定容量)范围内变化。

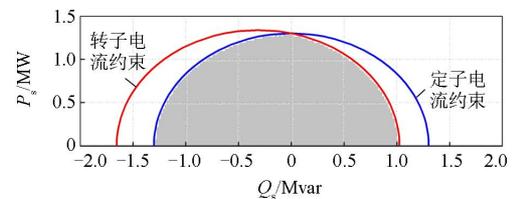


图 2 额定机端电压下定子侧无功功率运行范围

Fig. 2 Reactive power capability of DFIG stator under rated terminal voltage

图 3 进一步给出了不同机端电压下 DFIG 定子侧无功功率的运行范围。图中：曲线分别对应于 0.9、1.0 和 1.1 倍额定机端电压下定子侧的无功功率极限。从图 3 可以看出：DFIG 定子侧的无功功率运行范围与机端电压密切相关；机端电压越低，定子侧无功功率运行范围越小。以定子侧输出有功功率  $P_s$  为 1 MW 为例，当机端电压从 1.1 p.u. 下降至 0.9 p.u. 后，定子侧无功功率运行范围将从  $-1.02 \sim 0.71$  Mvar 缩小至  $-0.62 \sim 0.43$  Mvar，无功调节能力下降约 40%。

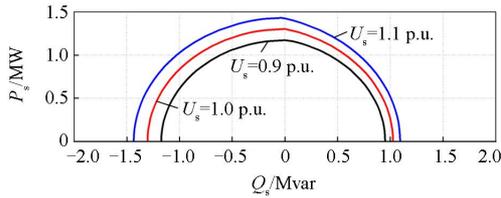


图 3 定子侧无功运行范围随机端电压的变化情况  
Fig. 3 Influence of terminal voltage on reactive power capability of DFIG stator

### 1.3 DFIG 网侧变流器的无功功率调节能力

DFIG 网侧变流器功率的运行范围受网侧变流器的电流限值约束。DFIG 网侧变流器电流  $I_g$  可写成：

$$I_g = \sqrt{\left(\frac{P_g}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{Q_g}{U_s}\right)^2} \quad (13)$$

因此，在网侧变流器电流限值  $I_{g,max}$  的限制下，网侧变流器无功功率  $Q_g$  的运行范围为

$$Q_{g,min} \leq Q_g \leq Q_{g,max} \quad (14)$$

其中：

$$Q_{g,max} = +\sqrt{U_s^2 I_{g,max}^2 - P_g^2} \quad (15)$$

$$Q_{g,min} = -\sqrt{U_s^2 I_{g,max}^2 - P_g^2} \quad (16)$$

式(15)和式(16)表明，DFIG 网侧变流器无功功率调节能力不仅受网侧变流器电流限值约束，而且还与机端电压、网侧变流器有功功率有关。

仍以前述 1.5 MW 商用 DFIG 机组为例，图 4 给出了不同机端电压下 DFIG 网侧变流器的无功功率运行范围。从图 4 可以得出以下结论。

(1) DFIG 网侧变流器最大无功输出和吸收能力是对称的。额定机端电压下，网侧变流器无功输出和吸收能力极限随有功功率变化在  $0 \sim 0.48$  Mvar(对应于  $0 \sim 100\%$  的网侧变流器额定容量)范围内变化。

(2) 网侧变流器的无功功率运行范围与机端电压密切相关；机端电压越低，网侧变流器无功功率运行范围越小。以网侧变流器输出有功功率为 0.4

MW 时为例，当机端电压从 1.1 p.u. 下降至 0.9 p.u. 后，网侧变流器无功运行范围将从  $\pm 0.35$  Mvar 缩小至  $\pm 0.16$  Mvar，无功调节能力下降约 55%。

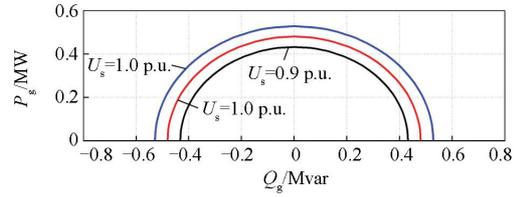


图 4 网侧变流器无功运行范围随机端电压的变化情况  
Fig. 4 Influence of terminal voltage on reactive power capability of DFIG grid side converter

### 1.4 DFIG 系统的总无功功率调节能力

DFIG 系统的总无功功率调节能力是 DFIG 定子侧和网侧变流器的无功功率调节能力之和。综合图 3 和图 4，不同机端电压下 DFIG 系统的总无功功率运行范围如图 5 所示。从图 5 可以得出以下结论。

(1) 额定机端电压下，随有功功率变化，DFIG 系统总无功输出和吸收能力极限分别在  $0.58 \sim 1.51$  Mvar 和  $0.78 \sim 1.78$  Mvar 范围内变化。值得注意，即使 DFIG 系统输出总有功功率达到其额定功率 1.5 MW，DFIG 系统仍具备向外最多输出 0.58 Mvar 和向内最多吸收 0.78 Mvar 的无功调节能力，分别占 DFIG 系统总额定容量的 39% 和 52%。

(2) DFIG 系统的无功功率运行范围与机端电压密切相关；机端电压越低，DFIG 总无功功率运行范围越小。以 DFIG 系统输出有功功率为 1.0 MW 时为例，当机端电压从 1.1 p.u. 下降至 0.9 p.u. 后，DFIG 系统无功运行范围将从  $-1.60 \sim 1.27$  Mvar 缩小至  $-1.11 \sim 0.91$  Mvar，无功调节能力下降约 30%。

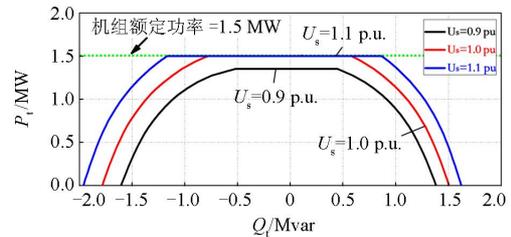


图 5 DFIG 系统总无功运行范围随机端电压的变化情况  
Fig. 5 Influence of terminal voltage on reactive power capability of DFIG system

## 2 DFIG 风电场作为分布式动态无功支撑系统的构想及实现方案

### 2.1 基本思路

根据前述分析，DFIG 系统具备较强的无功功率调节能力。但是目前多数 DFIG 风电场在实际运

行中采用恒定功率因数控制模式, 并没有充分发挥 DFIG 无功电压调节能力。因此如图 6 所示, 本文通过设计 DFIG 动态无功支撑系统, 充分挖掘 DFIG 系统的无功功率调节能力, 构建基于 DFIG 风电场的电力系统分布式动态无功支撑系统, 为电网在正常运行和紧急故障状况下提供优质的动态无功电压支撑。

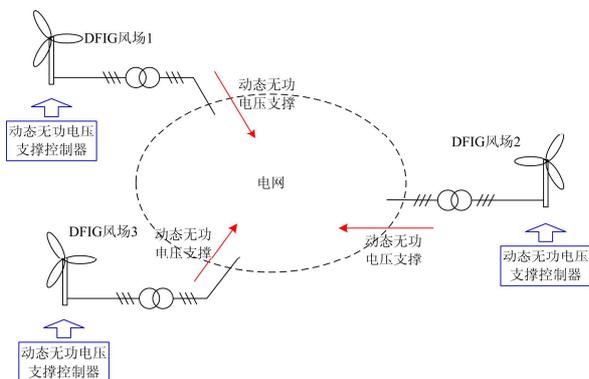


图 6 基于 DFIG 风电场的分布式动态无功支撑系统示意图  
Fig. 6 Illustration of distributed dynamic reactive power support system based on DFIG

这种基于 DFIG 风电场的分布式动态无功支撑系统的优势主要表现在以下 5 个方面。

(1) 我国 DFIG 风电场无功储备的挖掘潜力巨大。预计到 2020 年全国风电装机规模将达 200 GW, 约占全国电源装机总容量的 10%。根据 1.4 节的分析结论, 按最保守的估计(即考虑风电机组有功功率全部满发), 全国风电机组的容性和感性无功储备将分别在 78 Gvar 和 104 Gvar 以上, 无功储备总量相当可观, 可降低大量动态无功补偿装置投资<sup>[24]</sup>。

(2) DFIG 风电机组的无功调节响应速度快, 可以达到传统同步发电机无功调节响应速度的水平, 属于优质的动态无功调节设备。该特点将在后续算例分析中得到验证。

(3) 构建基于 DFIG 风电场的电力系统分布式动态无功支撑系统, 只需改进风电机组的现有控制系统, 不需要追加一次设备的投资, 投资收益率非常高。

(4) 风电场通常采用分布式的方式接入电力系统, 在电网各个电压等级层面和各个电气分区均有可能分布。因此, 基于 DFIG 风电场的动态无功支撑系统也是分布式的, 符合电网无功功率就地补偿的原则, 非常有利于电网分层分区无功平衡。

(5) 多数风电场处于比较偏远的地区, 通常位于电网末端, 主网对这些地区的电压支撑能力较弱。基于 DFIG 风电场的动态无功支撑系统恰恰可提高这些电网边缘地区的无功电压调节能力, 迎合这些

地区无功电压调节能力有待提升的实际需求。

## 2.2 控制方案

风电场的无功电压控制策略可分为 3 种: (1) 恒定功率因数控制; (2) 恒定机端电压控制; (3) 恒定风电场并网点电压控制。在上述 3 种控制方式中, 恒定功率因数控制是最常用的控制模式(通常控制风电机组功率因数恒为 1), 但风电场并网点电压控制最有利于电网无功电压调节。

在风电场并网点电压控制中, 不能仅考虑控制风电场并网点电压达到给定值, 还必须避免风电机组无功功率越限和机端电压越限。目前, 已有的风电场并网点电压控制策略只考虑 DFIG 系统的无功功率限制, 而未考虑与机端电压的协调问题。实际上, 不恰当的风电场并网点电压给定值很可能引起机组机端电压过高或者过低, 甚至导致风机脱网。

为解决上述问题, 本文提出了一种 DFIG 风电场动态无功支撑系统, 其基本结构如图 7 所示。图中:  $V_{pcc}$  和  $V_{pcc\_order}$  为风电场并网点电压的实际值和自动电压控制系统(Automatic Voltage Control, AVC)指令值;  $V_{ref}$ 、 $V_{ref\_max}$  和  $V_{ref\_min}$  为 DFIG 机端电压的参考值、参考值上限和下限值;  $V_i$  为机组  $i$  的机端电压实际值;  $Q_{refi}$ 、 $Q_{refi\_max}$  和  $Q_{refi\_min}$  为机组  $i$  总无功功率的参考值、参考值上限和下限值;  $Q_{refis}$  和  $Q_{refif}$  为机组  $i$  定子侧和网侧变流器的无功功率参考值。

如图 7 所示, 本文提出的 DFIG 风电场动态无功支撑系统分为两层。第 1 层是风电场并网点电压控制, 属于风场级控制。风电场并网点电压控制器根据风电场并网点电压的实际值和 AVC 指令值的偏差, 实时调节各台机组机端电压参考值。第 2 层是风电机组无功电压控制, 属于机组级控制。风电机组无功电压控制器根据其机端电压的实际值和参考值的偏差, 实时调节各台机组的无功功率参考值, 并继而分配至机组的定子侧和网侧无功控制器。

在风电场并网点电压控制中, 控制器输出限幅环节  $V_{ref\_max}$  和  $V_{ref\_min}$  的作用是限值 DFIG 机组机端电压, 防止机端电压越限。通常, 风电机组的低压和高压保护的的动作值分别为 0.9 p.u. 和 1.1 p.u., 故  $V_{ref\_min}$  和  $V_{ref\_max}$  的典型值可取 0.90~0.95 p.u. 和 1.05~1.10 p.u.。在风电机组无功电压控制中, 控制器输出限幅环节  $Q_{refi\_max}$  和  $Q_{refi\_min}$  的作用是限值 DFIG 机组无功功率, 防止定转子绕组和网侧变流器过流。 $Q_{refi\_max}$  和  $Q_{refi\_min}$  可基于式(7)、(10)和(14), 由风电场内各机组运行状态实时确定。在风电机组无功分配控制中, 可采用优先利用定子侧无功功率的原则, 在定子侧无功功率达到极限时再利用网侧变流器的无功储备。



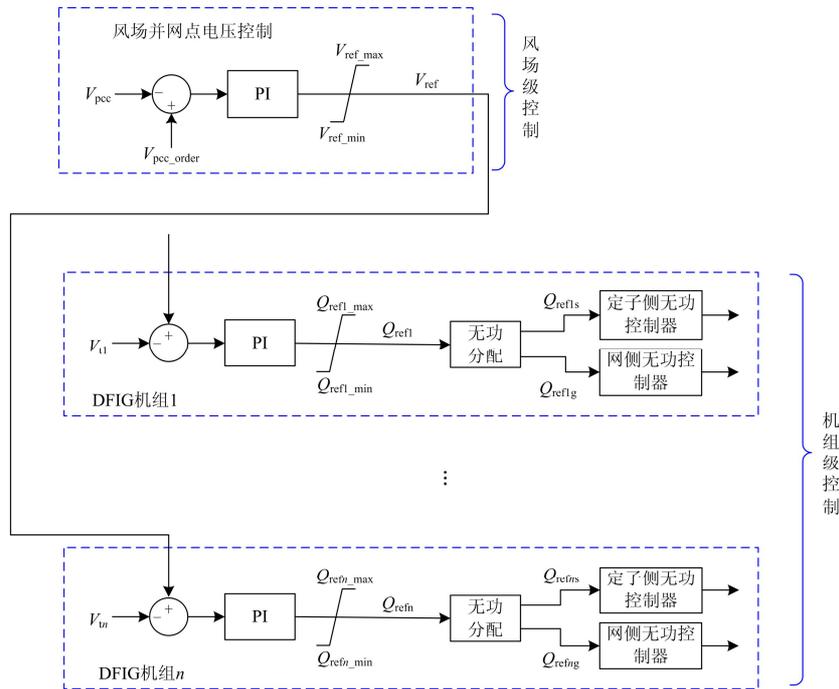


图 7 DFIG 风电场的动态无功支撑控制器

Fig. 7 Dynamic reactive power support controller for DFIG wind farm

### 3 算例分析

为验证前述方案的有效性,以浙江电网某 DFIG 风电场为例,采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行仿真研究。该风电场总装机容量 45 MW,包含 30 台 1.5 MW 风电机组。图 8 给出了该风电场及其接入电网的简化结构图。

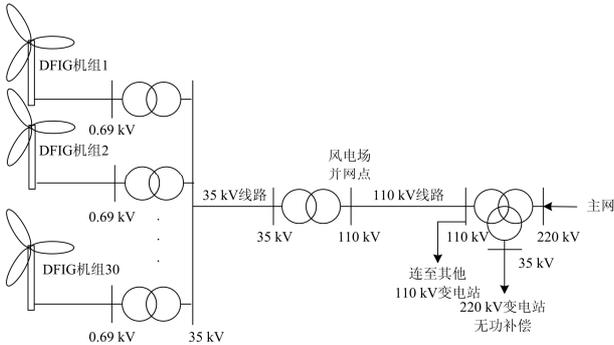


图 8 浙江某 DFIG 风电场及其接入电网的简化结构图

Fig. 8 Simplified structure of one DFIG wind farm in Zhejiang Power Grid

#### 3.1 场景 A(电网无功功率过剩)

在春节等节假日方式下,由于 110 kV 电缆线路充电功率过剩,通常存在 110 kV 电网无功功率倒送至 220 kV 电网的问题,难以满足功率因数要求。场景 A 模拟了春节方式下电网无功功率过剩时系统的运行情况。在该场景中,  $t=2$  s 前,风电场采用现有

的恒定功率因数控制模式;  $t=2$  s 时,风电场动态无功支撑系统被投入运行。

图 9 是场景 A 下 DFIG 机端电压、风电场并网点电压、DFIG 吸收总无功功率、220 kV 变电站下送无功功率的变化情况。如图所示,当风电场采取恒定功率因数控制模式时,220 kV 变电站向主网倒送的无功功率约 10 Mvar;当风电场的动态无功支撑系统投入运行后,风电场各风电机组将从 110 kV 电网吸收所有过剩无功功率,220 kV 变电站不再向主网倒送无功功率,从而有效解决电网无功功率倒送问题。

#### 3.2 场景 B(电网无功功率不足)

场景 B 模拟了研究系统在春节方式下当主网发生短路故障时的响应情况。场景 2 中,  $t=2.0$  s 时,220 kV 主网发生三相短路故障,  $t=2.1$  s 时,三相短路故障被切除。

图 10 是场景 B 下 DFIG 机端电压、风电场并网点电压、DFIG 吸收总无功功率、220 kV 变电站下送无功功率的变化情况。如图所示,无 DFIG 风电场动态无功支撑系统时,110 kV 母线电压在故障下将跌落至 105 kV;有 DFIG 风电场动态无功支撑系统时,风电场各风电机组最多将向主网输出约 20 Mvar 的无功功率,110 kV 母线电压跌落量在故障期间减少约 3 kV 且后续恢复速度也更快,从而有效改善了电网的电压恢复特性。

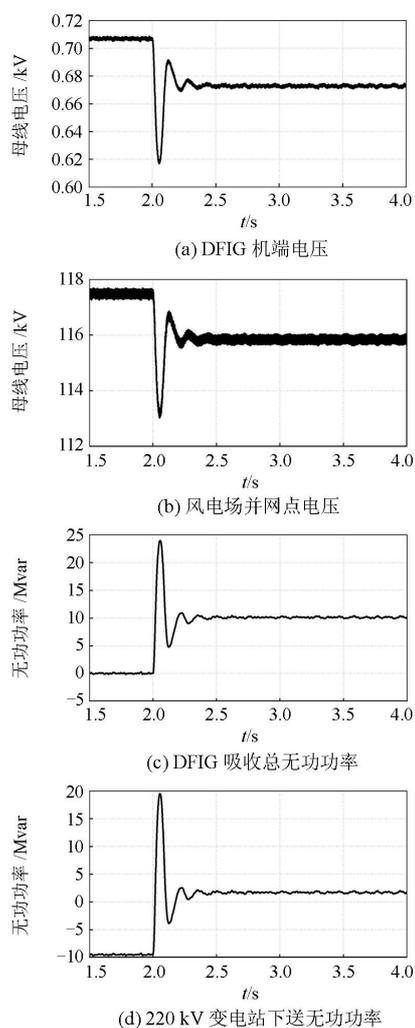


图9 场景A下风电场动态无功支撑器对系统响应特性的改善效果

Fig. 9 System performance improvement brought by dynamic reactive power support system under scenario A

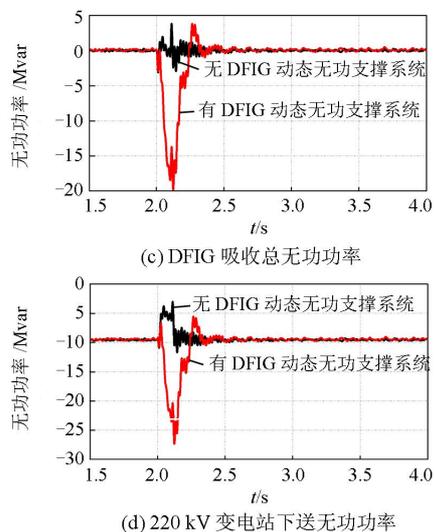
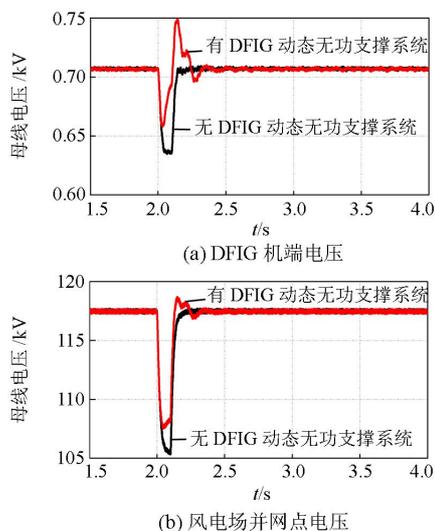


图10 场景B下风电场动态无功支撑器对系统响应特性的改善效果

Fig. 10 System performance improvement brought by dynamic reactive power support system under scenario B

## 4 结论

(1) DFIG系统具备较强的无功调节能力。当输出有功功率达到额定值时,DFIG系统仍然具备向外输出和吸收约40%和50%总额定容量的无功功率的能力;当输出有功功率低于额定值时,DFIG系统的无功调节能力将更强。

(2) 基于DFIG风电场的电力系统分布式动态无功支撑系统具有无功调节能力强、动态响应速度快、分布式布局、投资收益率高等众多优点,应用前景广阔。实际浙江电网的仿真结果验证了该技术在改善电网电压稳定性方面的可行性和有效性。

## 附录

1.5 MW商用DFIG及变流器参数如下所述。

(1) DFIG参数: 额定功率1.5 MW; 定子额定电压0.69 kV; 定子电阻0.0049 p.u.; 转子电阻0.0055 p.u.; 定子漏抗0.0924 p.u.; 转子漏抗0.0995 p.u.; 激磁电抗3.9528 p.u.。

(2) 变流器参数: 网侧变流器额定容量0.45 MVA, 工作电压范围690+10%~20% V, 工作频率范围50+3%~5% Hz; 机侧变流器额定容量0.45 MVA; 工作电压范围0~690 V; 工作频率范围0~17 Hz。

## 参考文献

- [1] 杨睿茜, 陈红坤, 陶玉波, 等. 双馈式风机控制器参数整定的实用方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 63-69.

- YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo, et al. A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 63-69.
- [2] 王燕萍, 郑涛, 王增平, 等. 不同转差率对双馈风机撬棒投入后的短路电流影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 8-14.
- WANG Yanping, ZHENG Tao, WANG Zengping, et al. Impact analysis of different slips on the short circuit current of DFIG after crowbar operation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 8-14.
- [3] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [4] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 周双喜, 鲁宗相. 风力发电与电力系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [6] 赵晶晶, 吕雪, 符杨, 等. 基于可变系数的双馈风机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 59-68.
- ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, et al. Frequency regulation of the wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG cooperative strategy with variable coefficients between virtual inertia and over-speed control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 59-68.
- [7] 姚骏, 余梦婷, 陈知前, 等. 电网对称故障下含 Dfig 和 Pmsg 的混合风电场群的协同控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 26-36.
- YAO Jun, YU Mengting, CHEN Zhiqian, et al. Coordinated control strategy for hybrid wind farms with DFIG and PMSG under symmetrical grid faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 26-36.
- [8] 严干贵, 侯延鹏, 王健, 等. 抑制超速脱网的双馈感应风电机组低电压穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 146-154.
- YAN Gangui, HOU Yanpeng, WANG Jian, et al. A DFIG wind turbine low-voltage ride-through control strategy restraining over-speed-tripping-off from grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 146-154.
- [9] 李东东, 梁自超, 周玉琦. 含风电场的受端系统暂态电压稳定性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 8-14.
- LI Dongdong, LIANG Zichao, ZHOU Yuqi. Transient voltage stability assessment of receiving end grid incorporating with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 8-14.
- [10] 廖志刚, 何世恩, 董新洲, 等. 提高大规模风电接纳及送出的系统保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 41-46.
- LIAO Zhigang, HE Shien, DONG Xinzhou, et al. Research on the system protection for enhancing the accommodation and transmission of large scale wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 41-46.
- [11] SANTOS-MARTIN D, ARNALTES S, RODRIGUEZ AMENEDO J L. Reactive power capability of doubly fed asynchronous generators[J]. Electr Pow Syst Res, 2008, 78(11): 1837-1840.
- [12] 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.
- [13] TAPIA A, TAPIA G, OSTOLAZA J X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications[J]. Renew Energy, 2004, 29(3): 377-392.
- [14] 陈宁, 朱凌志, 王伟. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 102-108.
- CHEN Ning, ZHU Lingzhi, WANG Wei. Strategy for reactive power control of wind farm for improving voltage stability in wind power integrated region[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 102-108.
- [15] 王松岩, 朱凌志, 陈宁, 等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 83-88.
- WANG Songyan, ZHU Lingzhi, CHEN Ning, et al. A reactive power control strategy for wind farm based on hierarchical layered principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 83-88.
- [16] 赵晶晶, 符杨, 李东东. 考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 33-38.
- ZHAO Jingjing, FU Yang, LI Dongdong. Reactive power optimization in distribution network considering reactive power regulation capability of DFIG wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 33-38.
- [17] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈式风电场改进的恒电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 79-85.

- LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. Improved constant voltage control strategy of DFIG based wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 79-85.
- [18] 刘皓明, 唐俏俏, 朱凌志, 等. 双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 79-85.
- LIU Haoming, TANG Qiaoqiao, ZHU Lingzhi, et al. Hierarchical control strategy of voltage and reactive power for DFIG wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 79-85.
- [19] 曹军, 张榕林, 林国庆, 等. 变速恒频双馈电机风电场电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 87-91.
- CAO Jun, ZHANG Ronglin, LIN Guoqing, et al. A voltage control strategy for wind farms using doubly fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 87-91.
- [20] 张学广, 刘义成, 海樱, 等. 改进的配电网双馈风电场电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 29-35.
- ZHANG Xueguang, LIU Yicheng, HAI Ying, et al. Improved voltage control strategy of doubly-fed induction generators wind farm in distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 29-35.
- [21] 王成福, 梁军, 张利, 等. 基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 23-28.
- WANG Chengfu, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Reactive power and voltage control strategy for wind farm based STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 23-28.
- [22] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 16-23.
- LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. A new scheme of reactive power compensation and voltage control for DFIG based wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 16-23.
- [23] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 双馈风电场无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 1-6.
- YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative control strategy for reactive power and voltage of wind farms with doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 1-6.
- [24] 付文秀, 范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.
- FU Wenxiu, FAN Chunju. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68.

收稿日期: 2015-12-10; 修回日期: 2016-02-27

作者简介:

黄弘扬(1987-), 男, 博士, 研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电、可再生能源发电及并网技术。

E-mail: eehongyanghuang@163.com

(编辑 姜新丽)