

双馈式风电场多阶段无功电压控制策略

盛四清, 陈 安, 杨少波

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北保定 071003)

Multi-stage Reactive Power and Voltage Control Strategy of DFIG Based on Wind Farms

SHENG Siqing, CHEN An, YANG Shaobo

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 为了应对大规模风电接入电网引起的电压稳定问题, 提出了一种新型的多阶段无功电压协调控制策略。该策略首先基于风功率预测数据对电容器组的投切进行提前优化; 稳态运行时, 通过分析双馈风力机的 PQ 关系曲线, 优先调整风电机组无功出力以实现风电场的无功调控; 电网故障时充分发挥静止无功补偿器的调节能力, 并在故障切除后限制其出力以避免电压过冲, 从而整体上实现无功电压的协调控制。最后以某一风电场系统的仿真结果验证了上述策略的有效性和可行性。

关键词: 双馈感应发电机; 电容器组投切; 静止无功补偿器; 协调控制; 多阶段

Abstract: In order to solve the voltage stability issue caused by large-scale wind farm integrated power grid, a new multi-stage coordinated control strategy of reactive power and voltage is proposed. The switching scheme of capacitor bank is pre-performed based on the predicted wind power firstly. Then in steady state, the reactive power of wind farm is regulated to control the reactive power and voltage by analyzing the relation between active power and reactive power of DFIG. In addition, SVC is controlled to make full use of its reactive power capability in fault state, and the voltage overshoot is avoided by limited power output after fault, which show the effectiveness of coordinated control reactive power and voltage overall. In the end, the validity and feasibility of proposed scheme are verified by simulation results of a practical wind farm.

Keywords: doubly-fed induction generator; switching of capacitor bank; static var compensator; coordinated control; multi-stage

0 引 言

近年来, 风电场并网容量不断增加, 特别是现阶段我国风电开发采用大规模、高集中的模式, 然

而风电场多建于电网末端, 电网中存在各种稳态、瞬态、轻度、严重、对称、不对称故障和各类电力谐波, 使得并网风力发电机组的运行环境非常恶劣和非理想化, 这就对风电并网后无功电压的运行控制策略提出了更高的要求^[1]。在此背景下, 双馈风电机组以其 PQ 解耦控制能力及良好的无功功率调节性能, 逐步取代笼型风电机组并成为主流机型。采用双馈感应发电机的风电场能够为电网提供电压支撑^[2-3], 可提高电网系统的运行稳定性, 实现发电机安全、快捷的柔性并网。文献 [4] 提出了一种新型的用于双馈感应发电机驱动器的无功功率控制器, 可减少有功功率的损耗; 文献 [5] 通过推导风电场的电压无功的灵敏度信息, 从风电场与整个电网之间的电压控制出发, 提出基于 DFIG 的无功电压控制策略, 充分发挥了其快速的无功调节能力。文献 [6] 分析了双馈风力机的无功功率极限, 探讨了如何高效地利用风电场自身的无功调节能力, 提出由 DFIG 机组承担风电场的全部无功调节任务以维持并网点电压稳定, 充分发挥了 DFIG 的无功性能。

双馈风电机组虽然有着 PQ 解耦控制能力以及良好的无功调节性能, 但在电网受到较大扰动的情况下, 以双馈感应发电机组自身的无功能力并不足以承担系统所需的无功功率, 需要额外无功补偿设备的支撑。文献 [7] 和 [8] 分别使用均值-方差映射启发式算法和粒子群优化算法, 在对风功率进行预测的基础上, 对有载调压变压器进行预先控制, 以达到有效地减少其调节次数, 完成高效地调节。文献 [9] 通过遗传算法求解多目标模型, 研究了分组电容器组与 DFIG 协调控制的电压策略。上述文献在预测风功率的基础上对离散设备进行投

切,可减少调节的频繁性,但风功率预测存在一定的误差以及在故障情况下离散设备动作存在延迟性,难以应对复杂多变的运行状况。文献[10]指出在风电场机端装设电容器组以及充分利用双馈机组无功能力的情况下,提出了双馈机群、风电场内 SVC 及 DFIG 内部变频器间的无功分配方法,并提出稳态和暂态不同的控制策略。文献[11]充分考虑了双馈风电场内的无功设备间存在着的动作时间上的差异以及物理分布上的特性,以无功裕度最大以及电压稳定水平最好为目标,提出了双馈风电机组和 SVC 间的实时协调控制策略。

以上文献均对 DFIG 机组和无功设备间的协调控制做了研究,但并未对系统运行过程中的各个阶段提出相应的策略。本文在详细分析双馈机组有功、无功功率特性及 PQ 容量变化极限规律的前提下,针对风功率随机变化的特性,提出了一种面向并网电压控制的 DFIG 机组、电容器组及静止无功补偿器之间配合的控制策略。其基本思路是通过预测风电场的风功率曲线,预先对电容器做出投切计划,在此基础上,依据实时风速调节 DFIG 及 SVC 的无功输出功率,并提出故障时的控制策略,实现电压的稳定控制。通过多阶段的无功电压协调控制,可扩大风电场无功运行的范围,提升电压品质,有效解决风电场无功电压波动问题。

1 DFIG 的无功功率特性

DFIG 的定子侧直接接入电网,转子侧经过交直交变频器接入电网,从而结构上实现了变速恒频运行。DFIG 注入系统的无功功率是由定子侧无功功率与网侧无功功率共同决定的。但由于网侧变频器采用 PWM 控制,一般运行于单位功率因数下,且传输的有功功率比较小,因此本文在分析双馈风电机组的无功功率能力时不考虑网侧变频器的无功输出能力,因此 DFIG 输出到电网的无功功率为

$$Q_g = Q_s \quad (1)$$

$$Q_s = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq} \quad (2)$$

式中: Q_g 为机组注入系统的无功功率; Q_s 为定子绕组侧无功功率; u_{sd} 、 u_{sq} 为定子电压 d、q 轴分量; i_{sd} 、 i_{sq} 为定子电流 d、q 轴分量。

采用 3/2 坐标变换,同时忽略定子侧绕组电阻的压降,得到 DFIG 定子侧功率极限关系^[6]:

$$P_s^2 + (Q_s + \frac{3U_s^2}{2x_1})^2 \leq (\frac{3x_m U_s I_{rmax}}{2x_1})^2 \quad (3)$$

式中: U_s 为定子侧电压; $x_1 = x_m + x_s$, x_m 为定、转子绕组之间的互感抗; x_s 为定子绕组电抗; I_{rmax} 为转子侧最大电流。

当定子有功功率 P_s 给定时,定子无功功率范围为

$$Q_{s1min} \leq Q_s \leq Q_{s1max} \quad (4)$$

其中:

$$Q_{s1min} = -\frac{3U_s^2}{2x_s} - \sqrt{(\frac{3x_m U_s I_{rmax}}{2x_s})^2 - P_s^2} \quad (5)$$

$$Q_{s1max} = -\frac{3U_s^2}{2x_s} + \sqrt{(\frac{3x_m U_s I_{rmax}}{2x_s})^2 - P_s^2} \quad (6)$$

转子侧功率极限关系为

$$P_s^2 + Q_s^2 \leq (3U_s I_{smax})^2 \quad (7)$$

$$Q_{s2min} \leq Q_s \leq Q_{s2max} \quad (8)$$

式中: I_{smax} 为定子侧电流最大值。

综合各限定条件,可得 DFIG 输出的无功功率 Q_s 的范围为

$$\begin{cases} Q_{smin} \leq Q_s \leq Q_{smax} \\ Q_{smin} = \max(Q_{s1min}, Q_{s2min}) \\ Q_{smax} = \min(Q_{s1max}, Q_{s2max}) \end{cases} \quad (9)$$

图 1 给出了某 1.5MW 双馈感应发电机的无功功率极限仿真图。图中,位于上半平面的实线表示风电机组受定子电流限制所能发出的无功极限,虚线便是受转子电流限制所能发出的最大无功;下半平面为吸收的无功功率极限曲线图。并且还仿真了机端电压发生变化时双馈风电机组在转子侧电流的约束下无功功率极限的变化曲线。

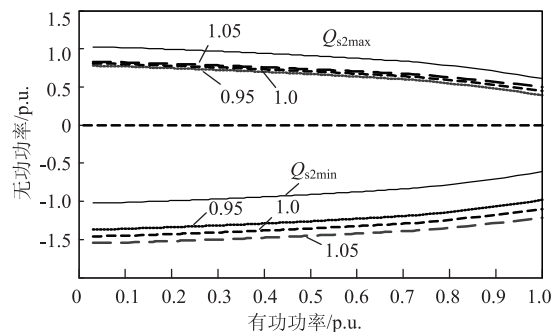


图 1 双馈电机无功功率极限

由图可知,双馈风电机组发出和吸收无功功率的能力范围并不是对称的,在发出同样的有功功率下,所能吸收的无功能力要比发出的无功功率能力强。而且当机端电压变化时,它的无功极限也随之变化,可以看出随着机端电压的升高,所能发出和

吸收的无功能力都将增强。此外随着机组发出有功功率的增加，其发出或吸收无功功率的能力将减弱，而且当机组额定运行时，双馈风电机组无功功率的调节能力将非常微弱。因此在机组满发状态下所发出的无功功率往往不足以应付系统运行的各种工况，需要电容器组、SVC 等无功补偿设备来提供额外的无功功率，以维持电压水平稳定。

2 协调控制策略

2.1 控制原理

现今，双馈式风电场的无功补偿设备基本都包括集中式补偿电容器组和动态无功补偿装置 SVC、STATCOM 等。并联电容器组等离散装置的投切是离散的而且投切动作时限相对较长，只能实现阶跃性的分段控制、难以精确平滑的调控，可将其用于静态模式下调节^[12]。与之相比，SVC、STATCOM 等动态无功补偿装置能够迅速准确地平抑双馈风电场并网点电压的波动，具有快速灵活的无功功率调节能力。然而，为了捕获最佳风能，得到更大的传输功率，我国风电场中的 DFIG 机组一般运行在恒功率因数方式下，直接导致其快速有效的无功电压调节能力不能得到充分的发挥。且在电网发生故障期间，风电场存在因风电机组的低电压穿越能力不足而发生脱网的现象，而且故障切除后，由于 SVC 等无功补偿装置不能自动及时地调整而引起系统电压升高，导致系统出现大量过剩的无功功率，可能出现“二次跳机”的现象^[10]，这严重影响了电网电压的恢复。电网故障下风电机组的不脱网穿越运行，并实现工程化，这正是我国现有风电开发中亟需深化研究的重要内容和方向^[1]。

针对上述问题，本文所提的双馈风电场无功电压协调控制策略是以风电场的升压站为控制中心，通过风功率预测信息预先进行电容器组的投切，这可避免电容器组投切过于离散而且还能提高系统的无功裕度。在此基础上提出 DFIG 机组与 SVC 之间针对不同工况的协调控制策略：在稳态运行时，通过分析双馈风力机的 PQ 关系曲线，优先调整 DFIG 机组无功出力以实现风电场的无功调控，为故障预留大量的无功功率；在电网故障时先让 SVC 来对系统无功进行调控，充分发挥其快速平滑的调节性能，且在故障切除后切换到稳态运行模式，以此实现双馈电机风电场多阶段的电压协调

控制。

2.2 控制结构

风电场的无功电压协调控制策略结构示意图如图 2 所示。图中： $U_{t,p}$ 、 U_{t,p_ref} 、 $\Delta U_{t,ref}$ 、 $\Delta Q_{t,w_ref}$ 、 $\Delta Q_{t,svc}$ 分别表示 t 时刻并网点电压的实测值、设定值、偏差值、风电场无功补偿参考值、SVC 无功参考值； U_{t+1,p_ref} 、 $v_{t+1,yucc}$ 、 $\Delta Q_{t+1,C}$ 表示 $t+1$ 时刻并网点电压设定值、风功率预测值、电容器组无功参考值； B_{min} 、 B_{max} 分别表示 SVC 等效电纳的最小和最大值； Q_{Cimin} 、 Q_{Cimax} 分别表示第 i 台风电机组所能发出的无功功率最小值和最大值。

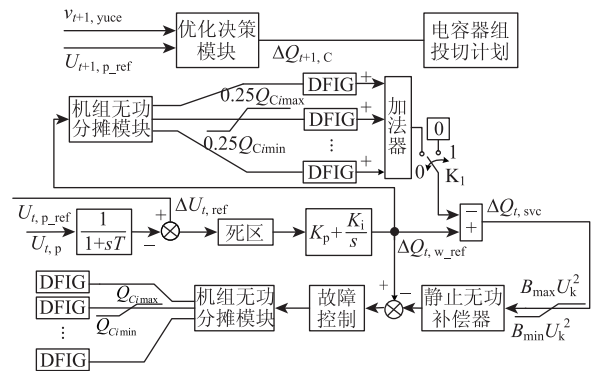


图 2 风电场协调控制结构

协调控制结构以控制并网点电压 $U_{t,p}$ 恒定为目标，其基本控制策略是通过 $t+1$ 时刻的风速预测值 $v_{t+1,yucc}$ 和并网点电压参考值 U_{t+1,p_ref} 预先对电容器组的投切进行优化控制，提出计划控制方案。在此基础上，对 t 时刻的目标电压 $U_{t,p}$ 进行实时控制。

其中电容器以价格低廉、操作方便、结构简单、实用性强等优点，在本文中作为基本无功补偿装置，在风速波动频繁的情况下发挥了重要作用，在对短期风功率预测的基础上，制定电容器组的投切计划，为系统提供较好的静态无功支撑，提高系统无功裕度。所以在考虑了电容器组的日动作次数以及投切的时间间隔的限制下，以并网点电压偏差最小为目标，预先制定并联电容器组的控制策略。图 3 给出了电容器组的优化控制结构图，其中图中的 S-Function 模块是 MATLAB/Simulink 里的函数编程模块，通过编程来控制如何投切电容器组以及投切的个数。

在稳态运行阶段，一方面考虑到发生暂态故障时需要预留大量的动态无功，以及缓解有功功率切除后无功功率过剩引起电压过冲的问题，提出的策

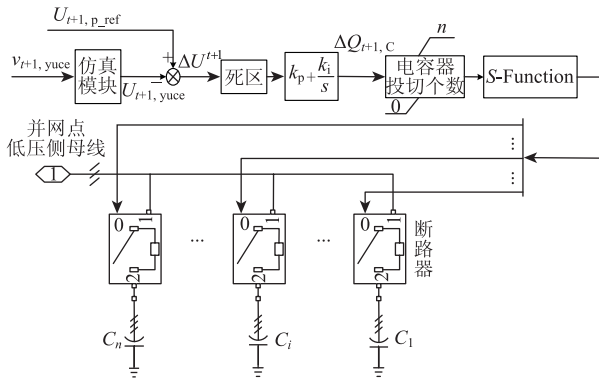


图 3 电容器组优化控制结构图

略是优先让 DFIG 提供无功功率；但另一方面，为了在一定程度上控制集电线路上的无功功率的传输，减少线路以及变压器上的有功损耗，故将 DFIG 无功功率的输出限制在 $[0.25Q_{Cmin}, 0.25Q_{Cmax}]$ 之间，取值 0.25 是因为在稳态运行时并网点电压波动的范围不算大而且有无功补偿设备电容器组以及 SVC 的支撑，主要考虑线路有功功率的传输。同时为了保证各风电机组按自身能力均衡地输出无功功率，防止因某台机组无功出力越限，引起其它机组产生链式反应，导致系统电压的崩溃，本文按照等裕度无功分配的方法，即

$$Q_{Ci_ref} = \frac{Q_{C_ref} Q_{Cimax}}{\sum_{i=1}^n Q_{Cimax}} \quad (10)$$

式中： Q_{Ci_ref} 、 Q_{C_ref} 分别表示为所有 DFIG 以及第 i 台无功输出参考值。

当发生故障时，由于 SVC 能够快速连续地调节，将优先让 SVC 承担电压调节的任务，如图 1 所示通过故障控制将开关 K_1 从 0 切到 1，剩余无功交由 DFIG 调节且不再限制 DFIG 的无功功率输出，同时将电容器组闭锁，不再对电容器组进行投切，当故障切除后恢复到稳态运行模式，从整体上实现了多阶段的无功电压控制。

3 仿真分析

3.1 算例

以某双馈风电场为例，利用 MATLAB/Simulink 建立如图 4 所示的并网型双馈电机风电场模型。该风电场总装机容量为 99MW，共有 66 台 1.5MW 的风电机组，等值为 4 台双馈风电机组，如图中的 G1、G2、G3、G4 所示，双馈风电机组

均采用无功功率控制模式。另外在并网点低压侧母线上装有 10 组 1Mvar 的并联电容器组和一台 SVC，在本节的仿真中不考虑有载调压变压器的无功调节能力以及各风电场地理位置的区别。

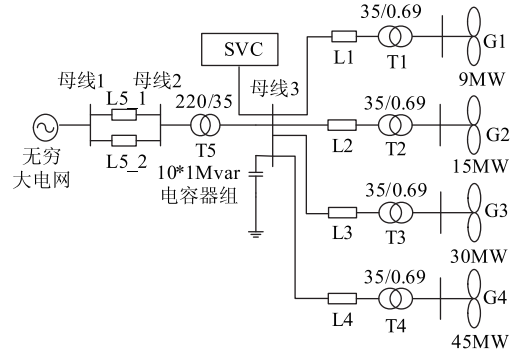


图 4 双馈风电系统模型

3.2 SVC 容量计算

文献 [10] 通过计算风电场满发时主变压器、机端变压器及线路所消耗的无功功率来确定 SVC 的容量，此方法需要潮流计算且不能保证并网点电压时刻保持在参考值上。本文通过仿真该风电场模型在各风速，负荷率为 1.0 且双馈风力机不参与无功功率调节的情况下，得到使并网点电压最接近 1.01p. u. 的 SVC 无功补偿值，结果如表 1 所示。可知 SVC 的最大无功补偿值为 12.781Mvar，在保证一定无功裕度的情况下，又为了在仿真中观察电压过冲的现象，取 SVC 最大无功功率值为 40Mvar。

表 1 各风速下 SVC 的无功补偿值

风速 m/s	补偿值/Mvar	风速 m/s	补偿值/Mvar
5	3.518	11	4.882
6	3.242	12	7.165
7	3.041	13	10.692
8	2.973	14	12.753
9	3.113	15	12.781
10	3.664	16	12.765

3.3 电容器组控制仿真研究

面对实时风速的扰动，电容器的预先投切方案可对系统的无功补偿起到重要的支撑作用。图 5 中的虚线为该风电场短期预测的风速曲线，根据此曲线我们预先确定了电容器的投切计划，控制目标是将并网点电压接近于 1.01p. u.，由此得到电容器

的投切方案，如图 6 所示。由于风速具有的随机性与波动性，风速的实际曲线见图 5 中的实线。

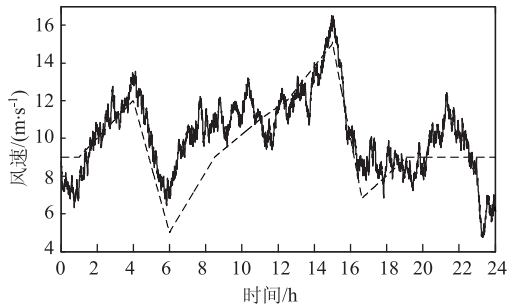


图 5 风速曲线

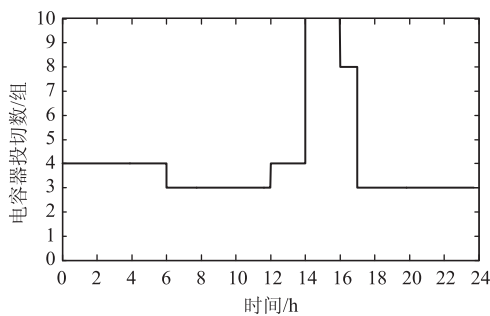


图 6 电容器投切方案

由以上两图可知，预测的风速曲线基本描绘出了实际风速曲线的趋势，而且从图 5 的风速曲线可以看出本文所采用的是波动较为剧烈的风速模型，风速最大值达到 16.5m/s，最小值仅为 4.7m/s，且不是持续上升或下降的变动，而是频繁地发生着变化，说明电容器组的提前优化投切具有实际意义。另外由图 6 所示的电容器组投切方案可以看出通过算法控制，电容器组的投切是不频繁的，符合实际的要求，但在高速区电容器投切的组数已经达到 10 组，此时就需要额外无功设备的支撑。

图 7 和图 8 还分别给出了风电场的实际有功曲线和电容器投切前后并网的电压曲线图。

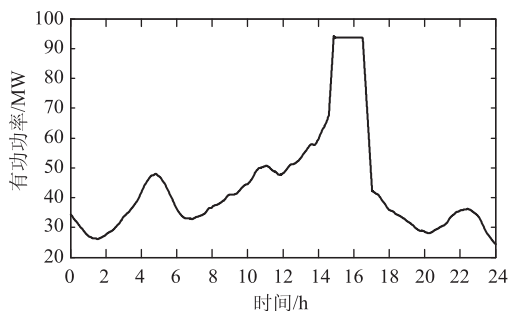


图 7 风电场有功功率

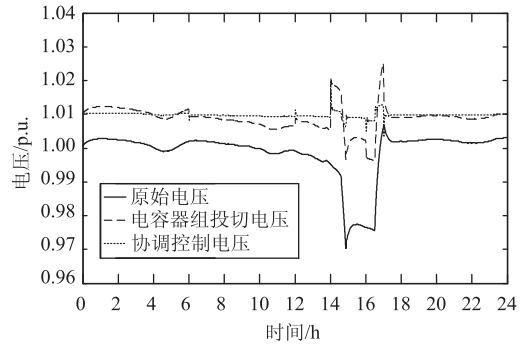


图 8 不同控制方式下电压曲线

从图 7 可以看出，双馈风电机组的有功功率随着风速的变化而变化，当达到额定风速 12m/s 时，风电机组处于满发状态，输出有功功率 99MW。

从图 8 的电压曲线可知，原始电压低于参考电压值，尤其在风速较高时，风电场出力达到最大值，由于此时未进行任何无功调节，无法满足风电场无功功率的需求而导致电压严重下降。电容器组的提前投切方案可减少并网点电压的偏差范围，提高系统的无功裕度，有利于系统的稳定运行，但由于电容器组投切具有阶跃性，需防止电压过激现象。

3.4 稳态运行仿真研究

图 8 同时还给出了协调控制策略下并网点电压在实时风速变化下的调节效果，可以看出，在协调控制下可有效平抑电容器组投切而引起的阶跃波动，精确地跟踪目标电压，使其维持在目标值附近。

根据图 1 提出的稳态控制策略，考虑电容器组的投切情况，得到实时风速下所有 DFIG 的总无功出力与 SVC 的无功出力，仿真结果如图 9 所示。可知，在稳态运行时，DFIG 和电容器组提供了主要的无功支撑，SVC 基本不发出无功，将其作为无功备用，为发生故障预留无功功率。

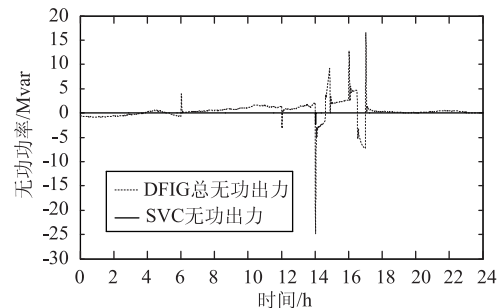


图 9 实时风速下 DFIG 和 SVC 的无功功率

3.5 故障控制仿真研究

假设4台风电机组的吹入风速均为12m/s, 母线1在3.4s时发生三相短路故障, 经过0.15s后故障切除, 且在故障阶段考虑到电容器组动作时间缓慢, 不能及时调节, 故将其闭锁, 不参与故障时的无功调节。分别就SVC恒电压控制模式以及本文所提的协调控制策略模式下进行仿真比较, 仿真结果如图10所示。

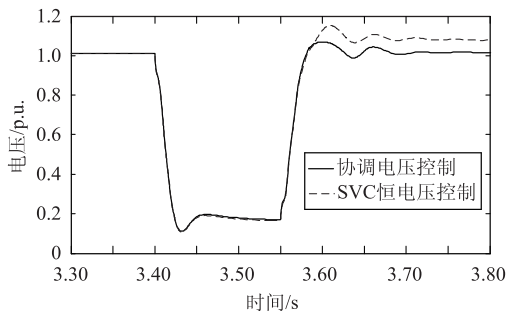


图10 三相短路故障时的电压仿真结果

由图10得知: 在SVC恒电压控制下, 当短路故障切除后, 由于SVC不能及时地跟踪系统的电压, 导致电网电压过冲, 最高达到1.153p.u.; 而在协调电压控制策略下, 当故障切除后及时地切换到稳态运行模式, 缓解了SVC对系统的无功过补偿, 有效地控制了电压过冲的问题。

4 结论

并联电容器组作为基本的无功补偿装置, 具有经济性, 运行维护简单等优点, 通过预测风功率曲线可制定电容器组投切计划, 减少其投切次数。再从稳态和故障两方面, 以DFIG机组、电容器组及SVC的相互配合为研究点, 阐明多阶段协调控制策略。算例系统的仿真结果表明电容器组可显著提高系统的电压水平, 所提策略能够实现对并网点电压的精确控制。结合当前研究的现状, 后续工作可研究在稳态运行阶段如何进行更好地协调系统的经济性与可靠性; 研究在故障阶段保证系统电压, 提高其电压穿越能力。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 侯佑华, 齐军, 王小海, 等. 大规模风电场的建模及其在内蒙古电网安全稳定运行的研究 [J]. 中国

电机工程学报, 2010, 30(4): 71-78.

- [3] 李晶, 李建林, 许洪华. 基于配电网无功优化的变速恒频双馈风电机群控制策略 [J]. 电网技术, 2006, 30(15): 59-64.
- [4] Tapia G, Tapia A, Ostolaza J X. Proportional-integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 488-498.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Erlich I, Nakawiro W, Martinez M. Optimal dispatch of reactive sources in wind farms [C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, USA: IEEE, 2011: 1-7.
- [8] Pappala V S, Nakawiro W, Erlich I. Predictive optimal control of wind farm reactive sources [C] // 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans, USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [9] 杨桦, 梁海峰, 李庚银. 含双馈感应电机的风电场电压协调控制策略 [J]. 电网技术, 2011, 35(2): 121-126.
- [10] 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.
- [11] 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(17): 1-6.
- [12] 陈惠粉, 乔颖, 闵勇, 等. 风电场动静态无功补偿协调控制策略 [J]. 电网技术, 2013, 37(1): 248-254.

收稿日期: 2014-12-28

作者简介:

盛四清(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, E-mail: hdbdssq@163.com;

陈安(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, E-mail: chenlan1101@126.com;

杨少波(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, E-mail: ysbddhd@163.com.

(责任编辑: 林海文)