

# 含 STATCOM 的双馈风电场无功协调补偿策略

陈鹏伟, 肖湘宁, 杨 洋, 李 璐

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

## Coordinated Reactive Power Compensation Strategy for DFIG Wind Farm with STATCOM

CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, YANG Yang, LI Lu

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**摘 要:** 双馈异步发电机 (DFIG) 可以参与系统无功功率的调节, 但其无功补偿作用有限, 为了实现 DFIG 的恒功率因数模式运行, 仍需要多种无功补偿装置 (如 FACTS 装置、固定电容器) 间的无功协调补偿。针对无功补偿装置不同的补偿特性, 本文提出了一种含 STATCOM 的无功协调补偿策略, 适用于解决风速波动期间 STATCOM 和固定电容器对无功的协调补偿问题, 其根据并网点电压通过闭环反馈灵活整定风电场所需无功参考值, 按照与集电母线的电压差将参考值进行不同母线间的分配, 并按照磁滞控制策略进行无功补偿装置之间的协调控制。PSCAD/EMTDC 下的算例仿真表明, 所提无功协调补偿策略在暂稳态情况下均具有良好的补偿效果。

**关键词:** 风电场; STATCOM; 无功; 协调补偿

**Abstract:** Doubly-fed induction generator (DFIG) can be involved in the system reactive power regulation, but the function of reactive power compensation is limited. In order to realize the constant power factor operation mode of DFIG, it still needs coordinated reactive power compensation among multiple reactive power compensation devices (such as fixed capacitors/FACTS devices). According to different compensation characteristics of reactive power compensation devices, a coordinated reactive power compensation strategy with STATCOM is proposed, which is applicable to solve such problem as coordinated reactive power compensation between STATCOM and fixed capacitors during the wind speed fluctuations. The basic theory is that required reactive power reference value of wind farm is set flexibly through the closed-loop feedback according to PCC voltage, the reference value of different buses is distributed according to its voltage deviation to bus bar, and the hysteresis control strategy is applied to realize coordination control among reactive power compensation devices. The simulation

results in the PSCAD/EMTDC environment show that the proposed coordinated strategy has a good compensation effect both in the transient and steady-state conditions.

**Keywords:** wind farm; STATCOM; reactive power; coordinated compensation

## 0 引 言

风能的时空分布不均特性给风电的大规模接入带来了诸多挑战<sup>[1]</sup>, 并网点电压控制与无功的协调补偿一直是国内外学者关注的研究内容之一。针对双馈风电场, 文献 [2-4] 采用基于分层原则的无功分配策略, 提出按单条集电线风机功率因数或风机无功容量进行无功补偿分配。文献 [5] 以并网点发生扰动之前的电压为控制目标, 根据电压无功相关灵敏度信息动态调节风电场无功输出功率。文献 [6] 以双馈风电场并网点电压和功率因数为控制目标, 提出了利用双馈风机进行无功调节的多模式多目标的协调控制策略。由于双馈风力发电机无功功率输出受有功功率输出波动的影响, 文献 [7] 引入静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 作为风机输出无功不足时的补充, 以维持风电场并网点电压。

上述研究中, 双馈风机均作为无功补偿装置参与风电场电压的协调控制, 但双馈风电机组无功补偿能力及其补偿极限在国内外学者已有共识<sup>[3,4,8,9]</sup>。在实际风场运行中, 双馈风机普遍采用的是恒功率因数模式 ( $\cos \varphi=1$ ) 运行<sup>[10]</sup>, 直接通过风机进行无功补偿的控制方案由于其工程实现难度也尚未普及。目前风电场的无功补偿形式主要分为

风电场升压站集中补偿,包括动态无功补偿、固定电容器补偿两部分。近年来风电场频发的脱网事故使得人们逐渐认识到风电场内动态无功调节的重要性<sup>[11]</sup>,STATCOM 因其优良的动态性能逐渐取代静止无功补偿器(static var compensator, SVC)成为目前风电场内动态无功补偿装置的首选。需要说明的是,不同母线连接的风机,其运行状态存在不可忽视的差异,导致不同母线对无功补偿的需求也有所不同,而不同补偿装置之间的特性差异,适用工况也有所差异。

就上述问题,本文针对含 STATCOM 的风电场升压站内无功补偿需求,提出了一种多目标、分层无功电压协调控制策略,为解决不同控制目标、不同母线结构和不同无功补偿装置之间的无功协调补偿提供一种可行的方案。PSCAD/EMTDC 下的算例仿真结果表明,所提无功协调补偿策略在暂稳态情况下均具有良好的补偿效果。

## 1 风电场无功协调补偿策略

本文提出风电场的无功协调补偿策略,包括控制目标、指令分配及装置协调 3 个部分。

### 1.1 控制目标

目前,风电场无功补偿的控制目标主要包括:风电场单位功率因数输出与额定电压输出。前者通过无功的就地补偿,避免了无功的大量吸收,保证了风电场并网点电压与远端的变电站母线电压基本一致;然而,在远端变电站电压处于正常运行的边缘状态时,并网点电压仍可能由于风电场有功输出波动而超出并网要求,因而,仍需控制并网点电压以避免电压越限。

风电场并网点电压主要受系统电压钳制,因此,当系统电压正常时,单位功率因数输出完全可以满足风电场并网电压的要求(额定电压的 97%~107%<sup>[12]</sup>);当系统电压处于临界或异常状态时,并网点电压仅需处于正常范围即可,从而满足并网电压的要求,并减少风电场无功补偿装置的无功调节压力。

根据上述分析,本文设定的控制目标为:在并网点电压处于正常范围时采用单位功率因数输出;当电压超出设定范围,调节无功补偿装置的输出,使并网点电压尽量满足并网要求。其无功补偿参考指令的整定方案,如图 1 所示。

电压比较器具有如下输出特性:

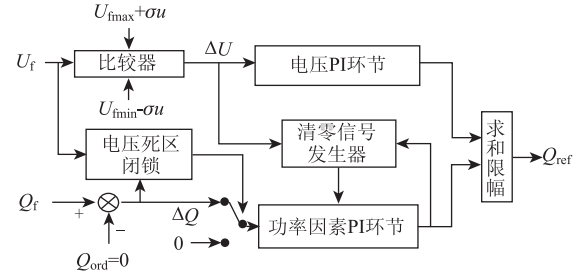


图 1 风电场无功参考值整定

$$\Delta U = \begin{cases} U_{\max} - U_f - \sigma u & U_f > U_{\max} - \sigma u \\ 0 & U_{\min} + \sigma u \leq U_f \leq U_{\max} - \sigma u \\ U_{\min} - U_f + \sigma u & U_f < U_{\min} + \sigma u \end{cases} \quad (1)$$

当并网点电压  $U_f$  处于设定范围 ( $[U_{\max} - \sigma u, U_{\min} + \sigma u]$ ) 之内时,比较器输出量  $\Delta U$  为零;当电压超出设定范围, $\Delta U$  经电压 PI 环节后,产生相应的无功补偿指令值  $Q_{\text{ref}}$ 。 $\sigma u$  为判定裕度,用于避免判定边界情况下因风电场有功功率输出波动而造成的电压越限。

电压死区闭锁的目的是避免当电压濒临限值时因功率因数调节造成的电压越限,具体实现方式为:当  $\Delta Q$  为感性(风电场输出无功减去功率因数对应的无功设定值为负)而电压濒临上限时,无功调节量  $\Delta Q$  设定为 0,此时调节功率因数对应的比例积分环节输出不变,防止进行容性无功补偿带来电压越上限;同理,当  $\Delta Q$  为容性而电压濒临下限时,通过进行电压死区闭锁防止因为感性无功的增加带来电压越下限的可能。

清零信号发生器的作用是当并网点电压超出设定范围时,根据电压应调节的方向(即  $\Delta U$  的正负性)和功率因数 PI 环节的输出性质决定是否将后者置零。以电压越下限为例,当并网点电压小于  $U_{\min} + \sigma u$  时,如果功率因数 PI 环节输出为感性,则将该数值置零,从而提供足够的无功储量。

### 1.2 指令分配

根据控制目标获得的总体无功补偿参考值,需进一步在汇流母线间进行二次分配(单母线分段也属于不同母线)。本文提出一种平衡汇流母线电压偏差的无功指令分配策略:首先,将总体无功补偿参考值按母线进行均等分配;然后,根据母线电压偏差,在该母线无功补偿装置容量范围内对分配的无功参考值进行修正。



如图 5 所示。该风电场共有 66 台 1.5MW 发电机组，经过 6 条集电线路汇流到场内升压站和 22km 线路连接到地区 110kV 变电站。场内的两条 35kV 母线各连接了 6MVA 的 STATCOM 和 6Mvar 的固定电容器进行无功补偿。风电场并网点短路容量为 1 000MVA。

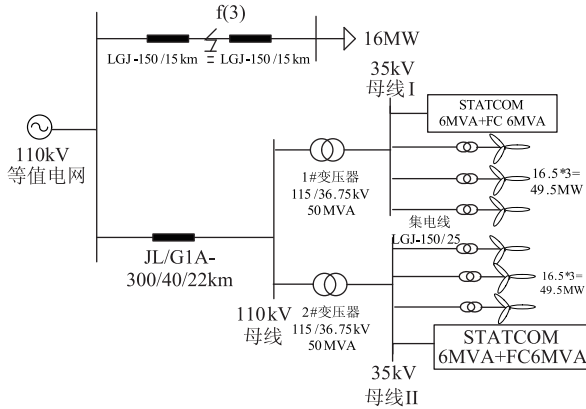


图 5 仿真系统

风电场建模依照场内集电线路对风电机组进行容量加权等值<sup>[14]</sup>，STATCOM 采用三电平结构，并忽略 STATCOM 的有功损耗，其直流侧采用直流电压源等效，连接电抗 5.3mH，具体结构与控制如图 6 所示。

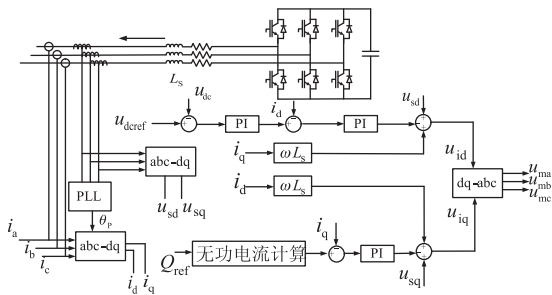


图 6 STATCOM 结构与控制框图

### 2.2 策略验证

从稳态和暂态两个角度对所提出的协调补偿策略进行验证。若无特殊说明，设定电压死区范围均为 1.065p. u. ~1.07p. u. 和 0.97p. u. ~0.975p. u.。

#### 2.2.1 稳态运行

为了体现所提策略在控制目标、指令分配和装置协调方面的优越性，选取了 4 种运行工况对所提策略进行稳态运行工况的验证。

##### ①电压濒临上限，有功增加

设定风电场初始风速为 7m/s，出力 25MW，

此时系统轻载，并网点电压为 1.064p. u.，在 0.5s 时风速由 7m/s 变为 12m/s，分别采用本文提出策略和恒功率因数控制策略的风电场并网点电压和风电场输出无功如图 7 所示。

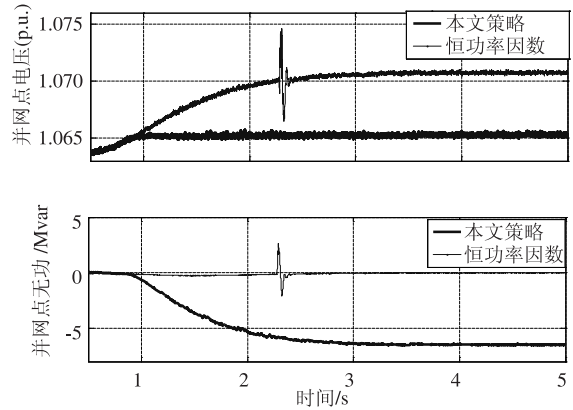


图 7 系统轻载、风电场风速增加

由图 7 可见，当并网点电压濒临上限 (1.07p. u.) 时，随着风速和风电场有功输出的增多，恒功率因数控制下的风电场并网点电压将超出要求，而采用本文提出的控制策略风电场电压被控制在 1.065p. u. 附近，没有出现并网点电压越限。

##### ②电压濒临下限，有功减少

设定风电场初始风速为 13.5m/s，风电场出力 90MW，系统重载，风电场并网点电压为 0.974p. u.，在 0.5s 风速由 13.5m/s 变为 7m/s，分别采用本文提出策略和恒功率因数控制策略的电压和无功如图 7 所示。

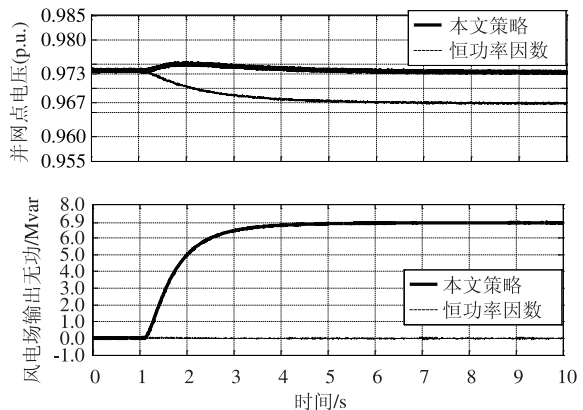


图 8 系统重载、风电场风速减少

由图 8 可见，随着风电场输出有功降低，恒功率因数策略控制下的电压持续降低，超出 0.97p. u.。当采用所提补偿策略，由于电压处于的

电压死区(0.97~0.975p.u.), 并且 $\Delta Q$ 性质为容性, 因此不会对功率因数进行调节, 随着有功的降低, 线路充电无功增加, 使并网点电压升高, 最终稳定在0.973p.u.左右。

### ③ 汇流母线有功出力不均等

设定风电场两条35kV汇流母线所接风机的初始风速为7m/s, 并网点电压为1.00p.u., 对35kV母线无功指令分配策略进行验证。在0.5s时母线I所接风机风速变为3m/s, 母线II所接风机风速变为13.5m/s, 分别采用本文策略和按容量平均分配策略的35kV母线电压差(母线I和母线II)及两条母线分配的无功指令如图9。

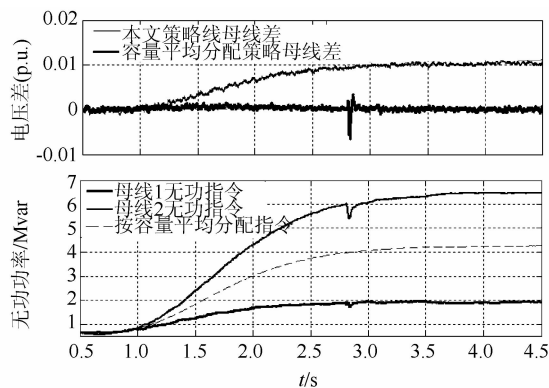


图9 风速变化期间35kV母线电压差及无功分配

由图9可见, 采用按容量无功分配策略, 当两条母线有功出力相差较大时(母线I有功出力3.8MW, 母线II有功出力45MW), 因为线路和升压变压器吸收感性无功不同, 其母线电压存在较大差异(0.01p.u.), 而采用本文策略, 在分配无功过程中考虑到两条母线电压的均衡, 所以整个过程中除了在2.8s左右因为母线I投入电容器造成电压短时扰动之外, 两条母线的电压差均维持在0附近。

### ④ 风电场出力波动, 无功参考值变化

设定风电场初始风速为12m/s, 从3s开始施加阶跃扰动, 用于验证STATCOM和固定电容器的协调策略, 风速变化如图10所示。作为比较, 采用了按STATCOM的补偿范围进行控制的策略, 其控制逻辑为当需要补偿的容性无功超过STATCOM的补偿极限时投入固定电容器, 当需要补偿的无功容量小于STATCOM的容量时切除固定电容器。母线无功分配指令、电容器控制指令和风电场输出无功如图11与图12所示。

由图11和图12可见, 当分配到母线的无功指

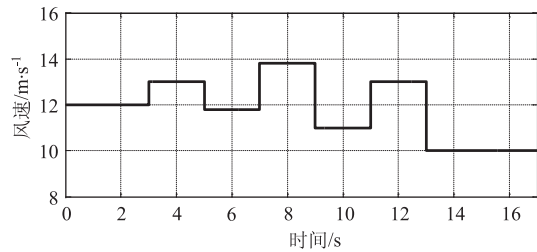


图10 风速变化

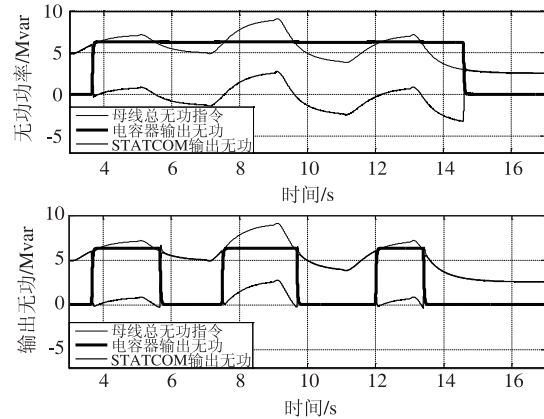


图11 母线无功指令及装置输出无功

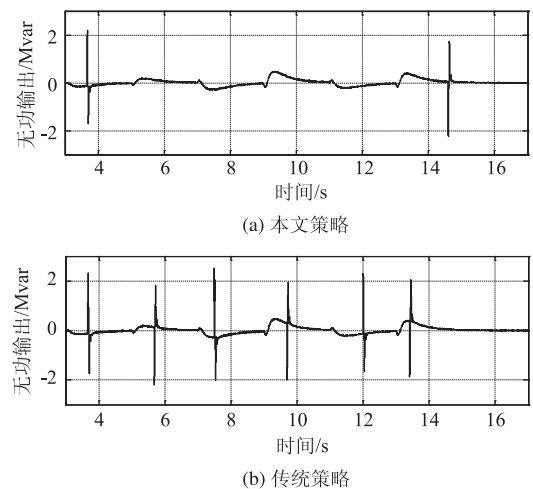


图12 风电场无功输出

令在STATCOM的补偿容量(6Mvar)附近的波动时, 按照STATCOM补偿容量进行电容器投切的控制策略, 指令持续波动导致了电容器的重复投切。采用本文所提策略, 当指令超过6Mvar时则固定电容器投入, 而当低于设定限值后固定电容器再切除, STATCOM可按需输出一定感性无功或容性无功, 电容器的投切次数大为减少, 其对应的风电场无功输出也较为平缓, 减少了因电容器频繁投切带来的无功波动。

### 2.2.2 暂态运行

设定初始时刻风电场风速为 7m/s, 出力为 25MW, 并网点电压为 1.00p. u., 经过 0.1s 在如图 5 所示的位置发生三相经 10Ω 阻抗接地短路, 经 0.12s 故障线路切除, 分别采用本文策略, 恒功率因数控制策略和恒电压控制策略的电压和风电场输出无功如图 13 所示。

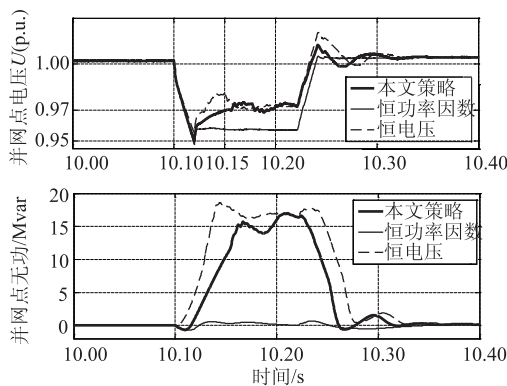


图 13 故障后并网点电压和风电场无功输出

由图 13 可见, 采用恒功率因数控制策略, 故障期间风电场电压降到 0.96p. u. 左右; 采用恒电压控制策略故障后电压较快恢复到 0.97p. u. 以上, 但是故障切除后相对稳态电压出现了 0.02p. u. 的过调, 采用本文提出的策略, 故障期间电压可以较快恢复到 0.97p. u. 以上, 并且故障切除后能够较快恢复到正常状态, 出现的电压过调值亦小于恒电压控制策略对应的电压过调值。

## 3 结 论

针对含 STATCOM 的双馈风电场, 本文提出了一种无功协调补偿策略, 通过风电场一母线一装置三级协调实现, 具有以下特点:

① 按母线电压分配无功, 适用于避免母线有功出力不均而出现个别母线电压偏高或偏低的情况, 提高无功储量;

② 基于“滞环”的 STATCOM 和电容器的协调控制方法, 可有效改善因为无功指令波动而造成的电容器频繁投切的问题;

③ 所提的控制策略不但适用于含 STATCOM 的双馈风电场, 同样适用于含其他连续无功调节装置(如 SVC)的其他类型风电场。

### 参 考 文 献

[1] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题 [J]. 电力系统

自动化, 2003, 27(8): 84-89.

- [2] 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.
- [3] Tapia A, Tapia G, Ostolaza J X, et al. Reactive power control of a wind farm made up with doubly fed induction generators (I) [C] //Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto.
- [4] 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.
- [5] 朱凌志, 陈宁, 王伟. 兼顾接入地区无功需求的风电场无功控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 80-85.
- [6] 陈宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设计和应用 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32-36.
- [7] 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.
- [8] 申洪, 王伟胜, 戴慧珠. 变速恒频风力发电机组的无功功率极限 [J]. 电网技术, 2003, 27(11): 60-63.
- [9] 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.
- [10] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 131-137.
- [11] 汪宁渤, 马彦宏, 丁坤, 等. 酒泉风电基地脱网事故频发的原因分析 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 42-46.
- [12] GB/T 19963—2011. 风电场接入电力系统技术规定 [S]. 2011.
- [13] 信珂, 周志勇, 李旷. DSTATCOM 在电网中的应用 [J]. 电气技术, 2011, 12(7): 32-35.
- [14] 李治艳, 刘其辉, 杜鹏, 等. 风电场动态等值的主要步骤和关键技术分析 [J]. 华东电力, 2013, 41(11): 2387-2393.

收稿日期: 2015-02-02

作者简介:

陈鹏伟(1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量、分布式发电与微电网技术, E-mail: chenpw2014@163.com;

肖湘宁(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统电能质量、现代电力电子技术应用等, E-mail: xxn@ncepu.edu.cn.

(责任编辑: 杨秋霞)