

大规模新能源并网下 SVG 协同风电场的电压精细化控制策略

向川¹, 畅昶², 周鑫¹, 李胜男¹, 和鹏¹, 杨蕾¹, 黄伟³

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756;
3. 云南电力调度中心, 云南 昆明 650011)

摘要: 新能源大规模并网下, 区域电压合格率降低的问题越来越显著, 其主要原因是新能源自身不稳定性和有待改进的控制策略。首先以提高区域电压精度和稳定性为目的, 详细计算 DFIG 无功限度, 并考虑过电流因素, 进一步更正 DFIG 无功下限; 然后改进 DFIG 机组控制结构, 将 GSC 无功容量计入 DFIG 无功补偿中, 使风电场在保留最大有功的同时, 深度发掘无功潜能, 提高风电场无功补偿能力, 并结合 SVG 设计出协调控制策略, 既能保留 SVG 灵活补偿能力, 又可使风电场提供无功支撑, 分担 SVG 补偿负担; 最后通过分析灵敏度、无功裕度等参数, 设计区域无功调配策略, 进一步完善电压精细化控制策略, 并通过两区域并网系统验证整套控制理论。

关键词: 无功补偿; 电压精细化控制; SVG 控制; DFIG 控制; 新能源并网

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.008 中图分类号: TM761+.1 文章编号: 1673-9140(2021)05-0061-11

Research on meticulous voltage cooperative control strategy between SVG and wind farm under the integration of large-scale renewable energy

XIANG Chuan¹, CHANG Chang², ZHOU Xin¹, LI Shengnan¹,
HE Peng¹, YANG Lei¹, HUANG Wei³

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. Yunnan Power Dispatch Center, Kunming 650011, China)

Abstract: With the integration of large-scale renewable energy, the problem of the reduction of the regional voltage qualification rate becomes more significant than ever before because of the stability issues and the poor control performance of the renewable energies. In order to improve the accuracy and stability of the regional voltage, this paper investigates the reactive power limit of DFIGs by detailed calculation. The overcurrent factor is taken into account to further correct the reactive power lower limit of DFIGs. Then the control structure of DFIGs is improved by considering the reactive power capacity of GSCs in the DFIG reactive power compensation. Hence the reactive power compensation capability of the wind farm can be deeply exploited and the maximum active power would not be affected. In addition, a coordinated control strategy of wind farms and SVG is proposed, which can not only retain the flexible compensation capability of SVG, but also enable the wind farm to provide reactive power support and share the burden of SVG compen-

收稿日期: 2020-12-04; 修回日期: 2021-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(51777176); 云南电网有限责任公司科技项目(056200KK52180067)

通信作者: 畅昶(1996-), 男, 硕士, 主要从事新能源并网、风机无功补偿、附加阻尼研究; E-mail: chris_e_mail@163.com

sation. Finally, by analyzing parameters such as sensitivity and reactive power remaining, this paper designs a regional reactive power allocation strategy, which can further improve the voltage control performance. The control performance is verified through a two-area power systems with the integration of wind farms.

Key words: reactive power compensation; meticulous voltage control; SVG control; DFIG control; new energy connecting grid

目前关于双馈感应电机(doubly-fed induction generator, DFIG)无功控制策略的研究较多^[1-8],但对静止无功补偿器(static var generator, SVG)协同DFIG对电压精细化控制的相关研究较为贫乏。文献[9]采用分层控制策略,以最优网损为目标,对DFIG和SVC合理分配无功,但未精确计算DFIG无功限度,无法充分利用DFIG的无功容量;文献[10]较为详尽地分析了DFIG无功机理,提出DFIG与网侧变流器(grid-side converter, GSC)按比例分配无功的控制策略,但未考虑GSC对直流侧电压的影响。无功限度是充分利用DFIG补偿无功的前提,但有关文献考虑因素较少,文献[11]通过经典的DFIG阻抗模型,推导出了基础的无功限度,并考虑了温度的影响,而温度并非DFIG无功限度的主要影响因素,DFIG内部仍有条件对输出无功有所限制;文献[12]考虑了GSC对DFIG无功容量的影响,但未继续进行分析以精确DFIG无功限度;文献[13]设计了DFIG无功控制策略,合理地利用GSC,并进行了最小弃风计算,但未考虑随机风速和吸收无功的情况;文献[14]详细分析了DFIG内部的无功关系,揭示了DFIG定子与转子侧之间的无功影响因素,并验证了其准确度。

电压精细化调控是建立在当前新能源渗透率不断提高的基础上提出的,通过改进新能源控制策略,在提高自身稳定性的同时充分利用无功容量参与系统无功补偿,适应于当前新能源快速发展的趋势。该文通过详细计算DFIG无功限度,考虑过电流影响,进一步精准确定子侧无功限度。在此基础上,考虑GSC的无功补偿能力,将调整后的无功极限作为无功分配基础。同时利用DFIG端电压对无功输出的影响,设计了DFIG无功控制策略,使DFIG稳定性与无功限度得到提升。此外,结合使用广泛的SVG,以电压精细化调控为目的,SVG灵活补偿为基础,DFIG作为无功支撑的控制策略,使两者保持灵活输出能力的同时,提高目标节点电压的精度和稳定性。该文还考虑了多风电场的情况,通过灵敏度和无功裕度等系数,调整风电场间的无功互补优

先级,实现区域间的SVG和风电场联调。最后搭建多风电场并网模型,对计算与设计的精细化调控理论和策略进行了详细的验证和分析。

1 DFIG 无功限度分析

为方便分析DFIG的功率关系,一般以定子与转子间单相磁链耦合的绕组等效模型为基准进行研究分析^[15-17],转子侧绕组折算至定子侧后的等效模型如图1所示。

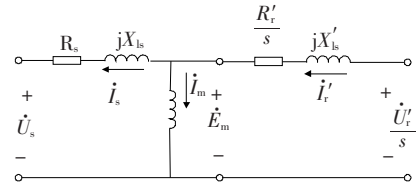


图1 折算关系下定转子绕组等效模型

Figure 1 Equivalent model of winding between stator and rotor under conversion relation

由图1可得出电压电流间的关系为

$$\begin{cases} \dot{U}_s = \dot{E}_m - \dot{I}_s(R_s + jX_{ls}) \\ \dot{U}'_r/s = \dot{I}'_r(R'_r/s + jX'_{lr}) + \dot{E}_m \\ \dot{E}_m = jX_m \dot{I}_m \\ \dot{I}_m = \dot{I}'_r - \dot{I}_s \end{cases} \quad (1)$$

式中 \dot{U}_s 、 \dot{I}_s 分别为定子侧的电压与电流; R_s 、 R'_r 为定转子侧的电阻; X_{ls} 、 X'_{lr} 为定转子间磁链漏抗; \dot{E}_m 、 \dot{I}_m 分别为磁链感应电动势和励磁电流; X_m 为励磁电抗; \dot{U}'_r 、 \dot{I}'_r 为转子侧电压与电流; s 为转差率。

转子侧各参量的折算为

$$\begin{cases} \dot{U}'_r = \frac{\dot{U}_r}{\alpha} \\ \dot{I}'_r = \alpha \dot{I}_r \\ R'_r = \frac{R_r}{\alpha^2} \\ X'_{lr} = \frac{X_{lr}}{s\alpha^2} \\ [\alpha = N_r k_r / (N_s k_s)] \end{cases} \quad (2)$$

式中 $N_r k_r$ 、 $N_s k_s$ 分别为转子侧和定子侧的绕组有效匝数; α 为转子侧对定子侧的折算变比。 X_r' 中 s 可将其励磁角频率 ω_r 转化为同步角频率 ω_1 。该模型以转子侧向定子侧输送功率为正参考方向,也即发电机模式。

以定子侧电压向量方向为基准,即

$$\begin{cases} \dot{U}_s = U_s + j0 \\ \dot{I}_s = I_{sd} + jI_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

式中 I_{sd} 、 I_{sq} 分别为 dq 坐标下定子侧电流的分量。

将式(3)代入式(1)可得到转子侧电流电压与定子侧电流电压的关系为

$$\begin{cases} \dot{E}_m = (U_s + I_{sd}R_s - I_{sq}X_{ls}) + j(I_{sd}X_{ls} + I_{sq}R_s) \\ \dot{I}_m = \frac{I_{sd}X_{ls} + I_{sq}R_s - j(U_s + I_{sd}R_s - I_{sq}X_{ls})}{X_m} \\ \dot{I}'_r = \frac{I_{sd}X_s + I_{sq}R_s - j(U_s + I_{sd}R_s - I_{sq}X_s)}{X_m} \\ \dot{U}'_r = \dot{I}'_r(R'_r + jsX'_r) + s\dot{E}_m \\ X_s = X_{ls} + X_m \end{cases} \quad (4)$$

进一步地,定子侧的有功和无功功率为

$$\begin{cases} P_s = \text{Re}(3\dot{U}_s \dot{I}_s^*) = 3U_s I_{sd} \\ Q_s = \text{Im}(3\dot{U}_s \dot{I}_s^*) = -3U_s I_{sq} \end{cases} \quad (5)$$

结合式(4)中 \dot{I}'_r 表达式,将其进一步用功率表示,即

$$\dot{I}'_r = \frac{(P_s X_s - Q_s R_s) - j(3U_s^2 + P_s R_s + Q_s X_s)}{3U_s X_m} \quad (6)$$

忽略漏抗和定子侧电阻,即 $X_s \approx X_m$ 、 $R_s \approx 0$, 则可将式(6)整理为关于 $I'_{r\max}$ 的功率约束,即

$$P_s^2 + \left(\frac{3U_s^2}{X_m} + Q_s\right)^2 \leq (3U_s I'_{r\max})^2 \quad (7)$$

根据式(7)可知,定子侧的有功和无功功率与 I'_r 紧密相关,功率所处范围为一圆心在 $(0, -3U_s^2/X_m)$, 半径为 $3U_s I'_{r\max}$ 的半圆($P_s \geq 0$)。之所以会有圆心偏移,是由于转子侧需要无功进行励磁,剩余无功会以 $1/s$ 的比率放大至定子侧输出。

在忽略损耗的情况下,为保持 RSC 与 GSC 间的直流母线电压稳定,一般流过两者的有功功率相同,而无功功率则互相解耦。因此,GSC 也具有一

定的无功输出能力,且其只与自身的容量和有功功率有关,即

$$\begin{cases} P_g = P_r = sP_s \\ P_g^2 + Q_g^2 = S_g^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 P_g 、 Q_g 分别为 GSC 的有功和无功功率,以流向 RSC 为正方向; S_g 为 GSC 的容量,一般为 $0.3 \sim 0.4$ p. u., 相对 RSC 较少^[18]。

通过以上分析,结合约束方程式(7)、(8),可得出单台 DFIG 的最大最小无功限度为

$$\begin{cases} Q_D \leq \sqrt{(3U_s |\dot{I}'_{r\max}|)^2 - P_s^2} - \frac{3U_s^2}{X_m} + \sqrt{S_g^2 - (sP_s)^2} \\ Q_D \geq -\sqrt{(3U_s |\dot{I}'_{r\max}|)^2 - P_s^2} - \frac{3U_s^2}{X_m} - \sqrt{S_g^2 - (sP_s)^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 Q_D 为 DFIG 输出无功功率。

DFIG 吸收电网无功时,自身电流急剧升高,如不考虑此因素,易引起绕组损耗,大大降低 DFIG 的使用寿命。因此在 DFIG 吸收无功限度基础上,考虑过电流因素,进一步精确计算 DFIG 无功补偿能力。

DFIG 并网处电流由定子侧电流与 GSC 侧电流组成,若 GSC 与图 1 中的 RSC 电流参考方向相同,则可得过电流的约束条件为

$$|\dot{I}_s - \dot{I}_g| \leq I_{D\max} \quad (10)$$

根据 GSC 与定子侧间的电压及功率关系可得

$$\begin{cases} \dot{U}_s = \dot{I}_g(R_g + jX_g) + \dot{U}_g \\ P_g = -\text{Re}(3\dot{U}_g \dot{I}_g^*) = \text{Re}(3\dot{U}_s \dot{I}_g^*) = sP_s \end{cases} \quad (11)$$

由此可进一步得到考虑过电流下的 Q_s 范围为

$$\begin{cases} \frac{(1-s)^2}{9U_s^2} P_s^2 + (I_{gq})^2 \leq I_{D\max}^2 \\ \dot{I}_g = I_{gd} + jI_{gq} = \frac{sP_s}{3U_s} + j\sqrt{\frac{2sP_s}{3R_g} - I_{gd}^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中 I_{gd} 、 I_{gq} 为 GSC 侧电流 \dot{I}_g 的实部与虚部; R_g 、 X_g 为 GSC 与定子侧之间的阻抗; $I_{D\max}$ 为 DFIG 输出的最大电流值,一般为 1.1 p. u.。结合式(9)即可得到考虑过电流影响的 DFIG 无功限度,可以更为精确地控制 DFIG 的无功补偿额度。

根据式(8)可知,单台 DFIG 的无功限度与 s 、

U_s 和 P_s 有关,一般电网稳定时, U_s 较为恒定,此时只与 s 和 P_s 相关。由式(9)、(12)可得到单台DFIG功率限度圆如图2所示。

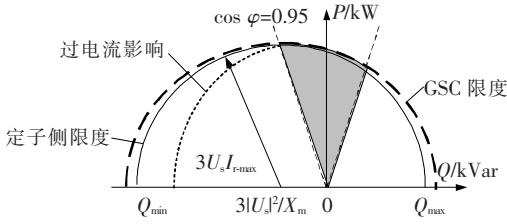


图2 单台DFIG无功限度圆

Figure 2 Reactive power limit circle of single DFIG

图2中,实线圆为定转子侧的无功限度,虚线圆为考虑GSC后的无功限度,点曲线为考虑过电流影响后的定子侧无功限度,由此可见,过电流主要对无功下限有较大影响。虚直线为标准工况下考虑功率因数0.95时的刻度,斜线区域即为正常工况下DFIG可利用的无功功率,经计算仅占整个区域的20%,若能将GSC考虑入内,调整控制策略,DFIG仍有较大的无功潜能可以利用。

2 电压精细化调控策略

电压精细化调控即在既定条件下,充分利用各区域所安装设备及控制手段,使关键节点处的电压波动和偏移情况得到最大改善。具体可通过电压偏移量式来衡量电压精度,电压偏移百分比为

$$\delta U_a = \left| \frac{U_a - U_a^*}{U_a^*} \right| \times 100\% \quad (13)$$

式中 U_a 为节点电压; U_a^* 为节点电压标准值。

2.1 SVG协同DFIG机组控制策略

DFIG机组在参与电压调控时,为使其端电压保持稳定,传统策略通常为电压外环控制,其无功补偿量往往与电压变化量密切相关,一般DFIG电压外环如图3所示。

从图3可知, U_s 改变时可改变转子侧电流,根据式(6)可知,定子侧无功可随转子电流变化,因此

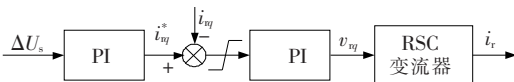


图3 DFIG电压外环结构

Figure 3 voltage outer-loop controller of DFIG

可通过对电压参考值设计如图4所示的额外偏移量,提高DFIG机组对节点电压的响应速度和无功补偿量,同时也可防止风机电压越线。

设置左右限 Q_{D+} 和 Q_{D-} 为高速时的DFIG无功限度,上下限 U_{s+}^* 和 U_{s-}^* 为DFIG稳定电压范围,由此可确定折线斜率为

$$k_s^* = \frac{U_{s+}^* - U_{s-}^*}{Q_{D+} - Q_{D-}} \quad (14)$$

考虑风电场主要以有功输出为主的情况,当DFIG达到输出极限时,若节点仍需无功支撑,方应考虑适当弃风减载,以达到节点电压稳定的目的。

当DFIG机组定子侧与GSC无功输出达到上限,且风速较高时,可通过对桨距角的控制,降低DFIG有功发出。由图2可知,此时DFIG发出感性无功的能力提升,最佳有功舍弃量为

$$(P_s - \Delta P_s')^2 + \left(\frac{3U_s^2}{X_m} + Q_s + \Delta Q_s' \right)^2 = (3U_s |i'_{r,max}|)^2 \quad (15)$$

式中 $\Delta P_s'$ 为待求有功舍弃量; $\Delta Q_s'$ 为当前节点处剩余补偿量,根据常用桨距角和有功关系,可以推论出桨距角的控制幅度。结合以上分析,设计如图5所示改进DFIG无功控制策略。

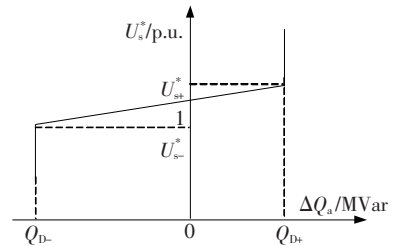


图4 DFIG电压控制折线

Figure 4 DFIG voltage reference value control

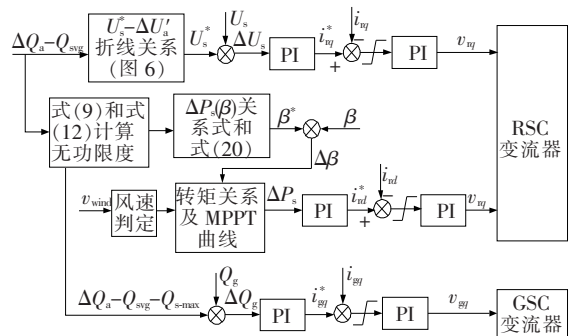


图5 改进DFIG无功控制策略

Figure 5 Improved DFIG reactive power control strategy

图 5 中,改进后的 DFIG 控制结构,可根据优先级分解为定子电压无功控制、GSC 无功控制、弃风减载。由于提高了 DFIG 电压—无功相应速度,且增加了 GSC 容量和弃风减载能力,DFIG 机组的无功补偿能力得到大幅地加强,且对有功输出影响十分微小,使风电场自身稳定的同时,分担区域网络的无功补偿工作。

SVG 补偿迅速,且无功功率完全可控,而 DFIG 机组受风速和机端电压影响较大,其可使用无功量除无功限度外,还需结合电压波动大小来发出或吸收无功^[19]。利用此特点设计如图 6 所示协调控制策略。

图 6 中, $S_{s,max}$ 为 SVG 容量, $\sum Q_{Dfmi\pm}$ 为 DFIG 机组无功上下限。根据当前的风机并网标准,当电网稳定时,应能使风机并网处电压处于 $0.97\sim 1.07$ p.u.^[20]。由图 6 也可看出,该策略最大程度释放了 SVG 灵活迅速的补偿能力,并通过改进 DFIG 控制策略,提升了风电场的无功储备,使风电场积极参与无功调节,并作为无功支撑,极大程度减轻 SVG 补偿负担,使两者在协调控制下可应对区域并网节点处电压的频繁波动和偏移。

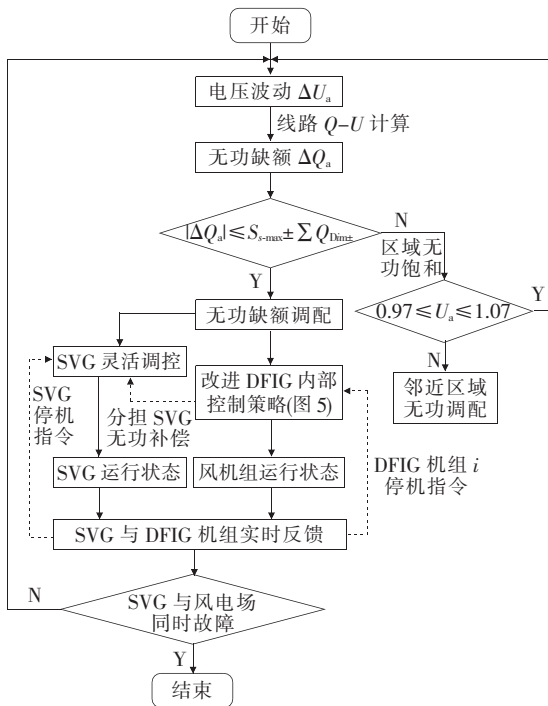


图 6 SVG 与 DFIG 机组协调控制策略

Figure 6 Coordinated control strategy between SVG and wind farm

2.2 多机组无功调配策略

节点之间灵敏度一般可通过计算得到,即

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta\delta}{dQ_{wi}} \\ \frac{d\Delta U}{dQ_{wi}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{K} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\Delta\mathbf{P}}{dQ_{wi}} \\ \frac{d\Delta\mathbf{Q}}{dQ_{wi}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中 $\Delta\mathbf{P}$ 、 $\Delta\mathbf{Q}$ 为注入节点的功率向量; $\Delta\mathbf{U}$ 为节点电压幅值向量; $\Delta\delta$ 为节点相角差向量; \mathbf{H} 、 \mathbf{N} 、 \mathbf{K} 和 \mathbf{L} 构成雅可比矩阵。

评估 SVG 剩余无功量可直接通过标么值的形式来表示无功裕度,第 i 台 SVG 的裕度系数为

$$R_{si} = \pm \frac{S_{si,max} - |Q_{svgi}|}{S_{si,max}} \quad (17)$$

式中 $S_{si,max}$ 为 SVG 的容量; Q_{svgi} 为当前 SVG 发出的无功,正负号表示当前为发出或吸收感性无功。

风电场剩余无功应通过机端电压和无功限度 2 个层面来反映,端电压接近上下限时,为保持风机稳定,可发出的无功量仍会受限,第 i 处 DFIG 机组的裕度系数为

$$R_{Di} = \begin{cases} k_+ \frac{|\sum Q_{Dfm+} - \sum Q_{Di}|}{S_{Dn}} \frac{|U_{s+}^* - U_s|}{U_{sn}}, & \Delta Q_{aj} \geq 0 \\ -k_- \frac{|\sum Q_{Dfm-} - \sum Q_{Di}|}{S_{Dn}} \frac{|U_{s-}^* - U_s|}{U_{sn}}, & \Delta Q_{aj} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 U_{s+}^* 、 U_{s-}^* 分别为端电压上、下限; S_{Dn} 、 U_{sn} 分别为 DFIG 的装机容量和标准电压; ΔQ_{aj} 为目标节点处待补偿功率; k_+ 、 k_- 为 DFIG 裕度比例系数。

在网架确定的情况下,节点之间的灵敏度基本保持恒定,根据灵敏度和无功裕度,将相邻的 SVG 和风机组视作一处补偿区域,并通过该区域的补偿能力系数作为该区域补偿能力的评估,即

$$M_i = \frac{E_{si}}{E_{si} + E_{Di}} R_{si} + \frac{E_{Di}}{E_{si} + SE_{Di}} R_{Di} \quad (19)$$

式中 E_{si} 、 E_{Di} 分别为 SVG 和风电场节点处的灵敏度。

通过对各关键节点处的电压检测,当电压位于 $0.97\sim 1.07$ p.u. 时,只进行补偿区域内的无功控制;当电压越限时,计算各补偿区域的无功补偿能力,并对电压越限处进行无功补偿,具体结构如图 7 所示。

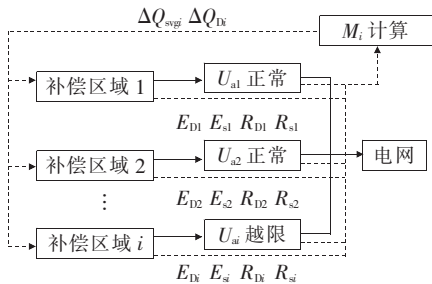


图 7 区域无功调配策略

Figure 7 Regional reactive power distribution strategy

由图 7 可知,该区域无功调配策略主要含有以下 3 种功能。

1)网源处存在电压波动时,计算出无功补偿量后,通过对各风机接入点的灵敏度进行计算,根据灵敏度大小确定优先补偿的风机和 SVG。

2)计算风机和 SVG 的无功补偿裕量,风机无功补偿能力还需考虑自身的电压水平,在灵敏度上考虑无功裕量,进一步更正各风机优先级。

3)当一处风机并网节点发生较大电压波动时,其余风机应根据当前状态,对该并网节点提供无功支撑,加速恢复并网节点电压。

3 算例

该文精细化调控策略由改进 DFIG 控制策略、SVG 及风电场协调控制、区域无功调配策略 3 组模块构成。为验证该策略,搭建了两区域并网模型,如图 8 所示。

由图 8 可知,每个区域由 1 风电场和 1 台 SVG 构成,母线 I、II、III 为该系关键节点。风电场 1 采用 33 台 1.5 MW 的 DFIG 机组,风电场 2 采用 50 台 1.5 MW 规模,GSC 按 DFIG 的 40% 容量设置,SVG 根据风电场装机的 15%~20% 和线路无功

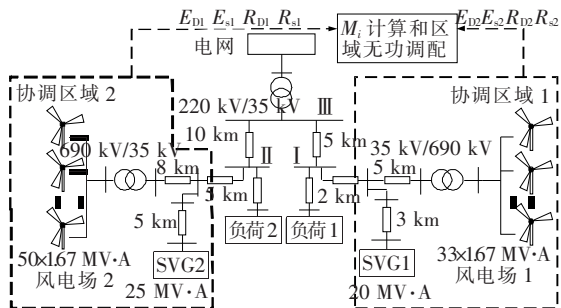


图 8 两区域并网模型

Figure 8 Two area power system with the integration of wind farms

需求,分别确定为 20 MV·A 和 25 MV·A。风电场的风速如图 9 所示。

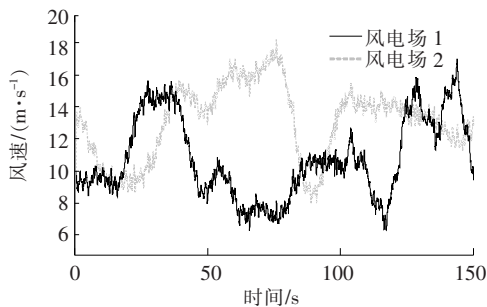


图 9 风电场随机风速

Figure 9 Random wind speed of wind farm

3.1 改进 DFIG 无功控制算例

区域 2 稳定前提下,通过设置区域 1 中负荷 1 大小和 DFIG 机组控制策略,检验 DFIG 无功限度的准确度,以及改进 DFIG 无功控制策略的可行性,具体如表 1 所示。

工况 1、2 时,SVG1 满发,风电场 1 无功限度和补偿量以及机端电流变化情况如图 10 所示,以此测试风电场 1 在考虑过电流下限时,控制策略是否保障风机机端电流在安全范围内。

由图 10(a)可知,考虑过电流时风电场 1 吸收无功的容量减小约 8%~20%,高风速时风电场 1 发出有功较多,无功限度下降较为明显,改进 DFIG 无功控制设计无功不得越限,在 30~40 s 和 130~150 s 高风速区控制风电场 1 无功抬升;由图 10(b)可知,此时 DFIG 机组电流未越上限(1.1 p.u.)。由此证明,考虑过电流影响可使 DFIG 的无功下限得到计算更为精确,提高无功吸收能力。

工况 3、4 时,风电场 1 无功与有功在不同控制策略以及弃风控制下的变化情况如图 11 所示。

图 11(a)中,采用该文改进 DFIG 控制策略相比传统控制,在低风速区时无功有明显的提升,主要

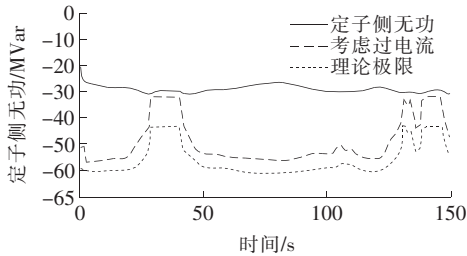
表 1 算例 1 变量设置

Table 1 Variable settings in simulation 1

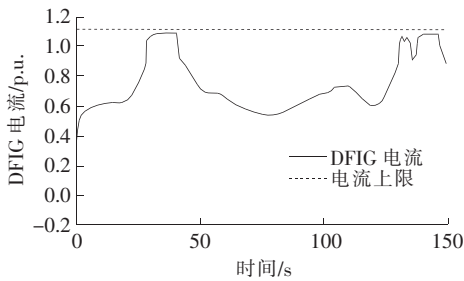
工况序号	基础负荷/ MVar	设置变量	测试内容
1	-60	不考虑过电流	DFIG 无功下限
2	-60	考虑过电流	DFIG 无功下限
3	60	弃风减载	DFIG 无功上限
4	60	弃风减载	DFIG 无功发出

是由于无功限度的精确计算和 GSC 参与无功输出,在弃风减载控制下,无功还可继续提升,且该控制仅发生在高风速区域,符合实际应用情况。

由图 11(b)可知,传统控制策略也有弃风减载的现象,但其损失有功明显多于改进 DFIG 控制策略,改进策略在无减载控制时,风电场 1 仍可在高风速输出额定无功,这是由于定子侧达到无功极限时,



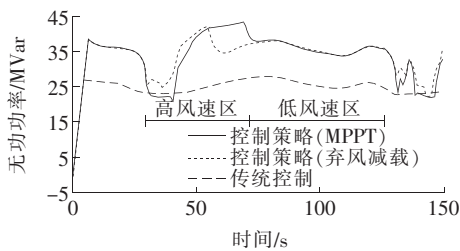
(a) 定子侧无功限度



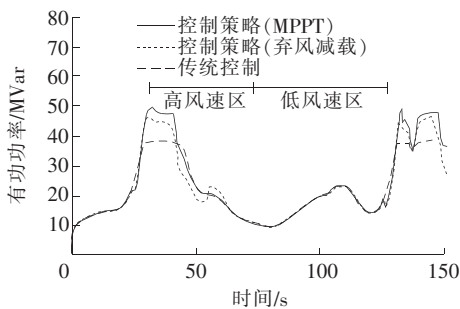
(b) DFIG 并网端电流

图 10 风电场 1 吸收无功限度

Figure 10 Reactive power lower limit of wind farm 1



(a) 风电场 1 无功功率



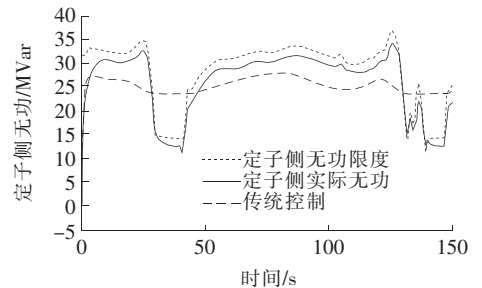
(b) 风电场 1 有功功率

图 11 风电场 1 发出无功限度和弃风减载

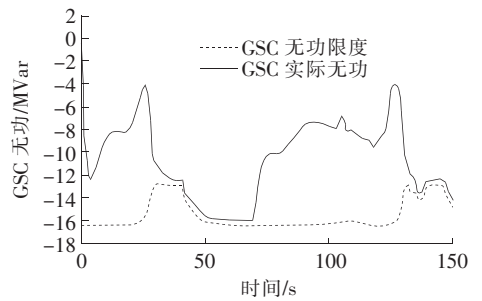
Figure 11 Reactive power upper limit and wind abandonment of wind farm1

GSC 分担了部分无功输出,极大地减小了 DFIG 机组定子侧无功负担。而在弃风减载下,风电场 1 的有功功率仍高于传统控制,这是由于式(14)的计算和改进策略控制,可使风电场 1 弃风量达到最小。

工况 3 时,DFIG 机组 1 定子侧与 GSC 的无功限度和发出感性无功量如图 12 所示。



(a) 定子侧无功功率



(b) GSC 无功功率

图 12 DFIG 机组 1 内部无功分配

Figure 12 Reactive power distribution among wind generators

由图 12(a)可知,该文控制策略下,大感性负荷时,定子侧无功可沿无功限度变化,而传统无功控制下,低风速时定子无功并未达限,高风速时又越过上限造成有功流失。

由图 12(b)可知,GSC 功率以图 1 中 RSC 参考方向为准,负值即向电网发出感性功率。该文策略下,定子侧满发情况下,GSC 可继续补偿剩余无功,高风速时定子侧无功限度降低,GSC 发出无功亦达上限,此时可投入减载控制,达到图 12 所示效果。

3.2 协调控制策略算例

以区域 1 为例,通过设置负荷 1 连续变化,引起电压波动,检验 SVG 与风电场 1 协调控制的合理性,具体如表 2 所示。

表 2 中,负荷 1 波动具体包括:25 s 时,每隔 5 s 阶跃上升 5 MVar,共 30 MVar,于 80 s 时阶跃降回基础负荷;90 s 时以同样规律,阶跃下降 30 MVar,

表 2 算例 2 变量设置

Table 2		Variable settings in the simulation 2		MVar
工况 序号	基础 负荷	设置变量	测试内容	
5	30	负荷 1 波动 ± 30	SVG 与 DFIG 无功发出	
6	-30	负荷 1 波动 ± 30	SVG 与 DFIG 无功吸收	

于 145 s 时回升至基础负荷。由此,测试不同性质负荷波动下,协调控制对电压精细化调控的作用。

工况 5 时,协调控制和传统控制下的目标节点电压的变化情况如图 13 所示,上、下虚线分别为 1.07、0.97 p.u. 电压标准,显然该文的协调控制下电压波动更小,相比传统控制策略,以 1 p.u. 为基准整体优化了 3%~5%,传统控制策略下波形越下限较为严重,协调控制提高了节点电压精度和稳定性。

工况 5 时,2 种策略下风电场 1 和 SVG1 无功输出情况如图 14 所示。由图 14(a)中可知,协调控制下风电场输出更多无功,相较传统控制无功提升了 5~8 MVar。由图 14(b)可知,传统控制下,风电场补偿能力较弱,SVG 有较长时间处于满发状态,协调控制下的 SVG 更为灵活,风电场 1 无功的提升减轻了 SVG 的补偿负担,且两者基本同时处于发出或吸收状态,多余的无功流动减少。此外,风电场 1 在总无功补偿中占比提高了约 10%~20%,其无功利用率得到了提升。

工况 6 时,协调控制和传统控制下的母线 I 电压的变化情况如图 15 所示。由图 15 可知,协调控制策略对电压超上限情况同样有稳定作用,相比感性负荷下优化了 5%~7%。

工况 6 时,2 种策略下 DFIG 和 SVG 无功吸收情况如图 16 所示。由图 16(a)可知,容性负荷时协调控制相较传统控制无功提升了 6~10 MVar;由

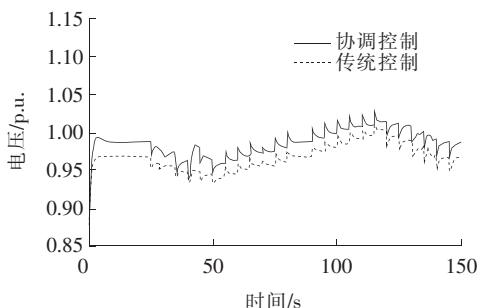
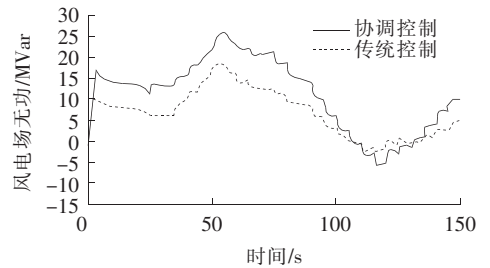
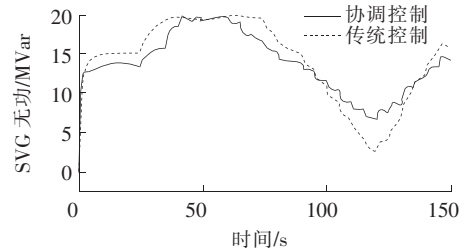


图 13 工况 5 下母线 I 电压波动

Figure 13 Voltage fluctuation of bus I under condition 5



(a)风电场 1 无功功率



(b)SVG1 无功功率

图 14 工况 5 下风电场 1 和 SVG1 输出无功

Figure 14 Reactive power output of wind generators and SVG under condition 5

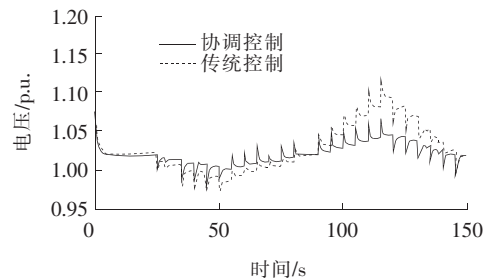
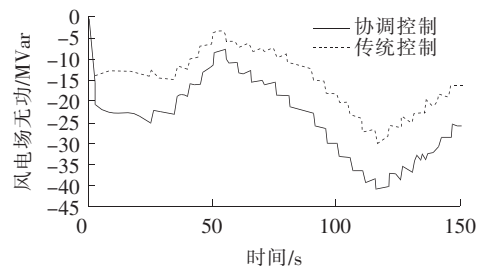
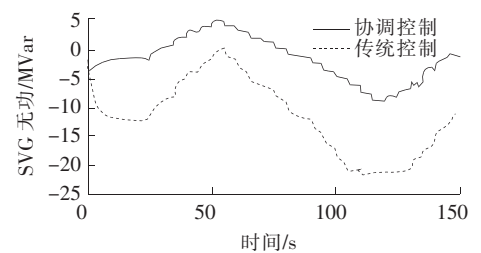


图 15 工况 6 下母线 I 电压波动

Figure 15 Voltage fluctuation of bus I under condition 6



(a)风电场 1 无功功率



(b)SVG1 无功功率

图 16 工况 6 下风电场 1 和 SVG1 输出无功

Figure 16 Reactive power output of wind farm 1 and SVG1 under condition 6

图 16(b)可知,SVG1 无功吸收差异更为显著,传统控制过于依赖 SVG,而协调控制发掘了 DFIG 机组 1 无功吸收能力,极大减轻了 SVG1 的补偿负担,对比可知,协调作用下风电场 1 在总无功补偿中占比提高了约 30%~40%。

3.3 区域无功调配算例

区域 1、2 都工作在协调控制,此时设置 2 区域负荷,在不同工况下检验区域无功调配的有效性,具体如表 3 所示。

工况 7 下,负荷 1 在 20 s 时上升 50 MVar,负荷 2 保持 30 MVar,计算负荷 1 变化前两区域的灵敏度、无功裕度,可得到区域补偿能力参数 M_i ,具体见表 4。

由表 4 可知,区域 1 中风电场 1 和 SVG1 的灵敏度虽然都高于区域 2 中的机组,但区域 1 中 E_{D1} 虽高于 E_{D2} ,但 R_{D1} 过低,即风电场 1 无功输出已接近饱和,由图 9 的风速波动可知,20 s 后风速逐渐升高,风电场 1 的无功上限会下降,若此时负荷 1 升高 50 MVar,则仅靠区域 1 的机组维持母线 I 电压不够可靠。区域 2 灵敏度基于母线 I 计算而得,而 $M_2 > M_1$,故可通过区域无功调配,使区域 2 可向区域 1 发出无功。

工况 7 下,系统在区域调配和仅协调策略下的母线 I 和 II 电压波形如图 17 所示。由图 17(a)可知,负荷 1 突增时,仅靠协调控制策略无法实现电压合格,而在区域无功调配下,电压拾升 0.03 p.u.,母线 I 电压高于 0.97,且回升速度优于协调策略,这是由于协调控制下 SVG1 和 SVG2 的裕度充足,可在电压突变时提供足够缓冲;由图 17(b)可知,区域

调配在区域 2 电压合格的情况下进行,区域 2 无功输出提高后,并未导致母线 II 电压越限。

工况 7 下,风电场 2 和 SVG2 的无功出力如图 18 所示。由图 18 可知,20 s 时负荷 1 突变后,区域调配由表 4 计算结果,向区域 2 机组发出指令,SVG2 提高至满发,风电场 2 在区域调配下发出无功比仅有协调策略时提高了 27%~45%,由此提高系统电压合格率和精度。

工况 8 下,母线 III 在 50 s 下降 0.15 p.u.,此时区域调配与仅协调策略时对于母线 III 的电压支撑如图 19 所示。

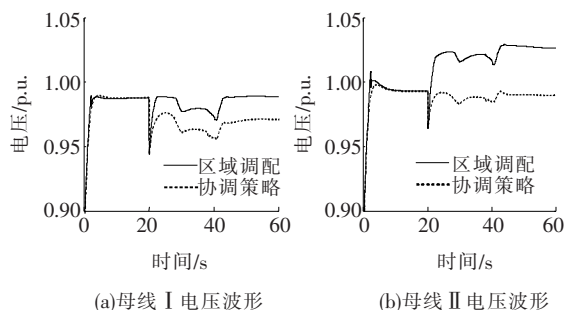


图 17 工况 7 下母线 I 和 II 电压波形

Figure 17 Voltage amplitude variations of bus I and II under condition 7

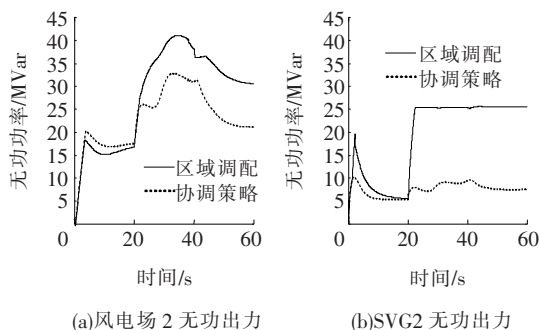


图 18 工况 7 下风电场 2 和 SVG2 无功出力

Figure 18 Reactive power output of wind farm 2 and SVG2 under condition 7

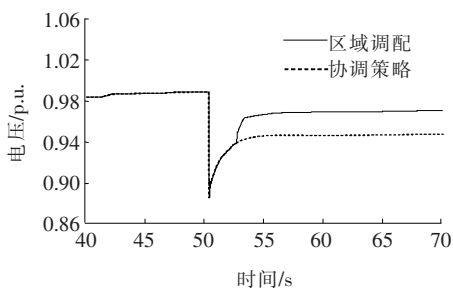


图 19 工况 8 下母线 III 电压波形

Figure 19 Voltage amplitude of bus III under condition 8

表 3 算例 3 变量设置

Table 3 Variable settings in the simulation 3

工况 序号	不同区域负荷/MVar		设置变量	测试内容
	1	2		
7	50→100	30	区域调配	区域 2 对区域 1 补偿
8	30	40	母线 III 电压	区域 1、2 无功分配

注:→为负荷变化

表 4 工况 7 下区域无功评估

Table 4 Evaluation of reactive power compensation capability under condition 7 p. u.

区域	目标 母线	灵敏度		无功裕度		M_i
		E_{s1}	E_{D1}	R_{s1}	R_{D1}	
1	I	0.068	0.036	0.550	0.006	0.361
2		0.042	0.026	0.540	0.270	0.437

母线Ⅲ为电网联络点,一般要求其电压位于 $0.95\sim 1.05$ p.u.之间。由图19可知,50 s电压跌落时,仅靠协调策略无法继续提高母线Ⅲ电压精度,稳定时为 0.943 p.u.。而当区域调配作用时,母线Ⅲ稳态可达 0.97 p.u.,达到电压合格标准。电压跌落时母线Ⅰ和Ⅱ的电压变化如图20所示。

由图20可知,当母线Ⅲ电压跌落时,母线Ⅰ和Ⅱ也随之下降,由区域调配策略,当母线Ⅰ和Ⅱ电压低于 0.97 p.u.时,区域调配通道关闭,优先调整近端母线。当母线Ⅰ和Ⅱ达标时,开启区域调配通道,两区域继续发出无功,提高母线Ⅲ电压精度,使母线电压均处于合格水准,提高系统稳定性。

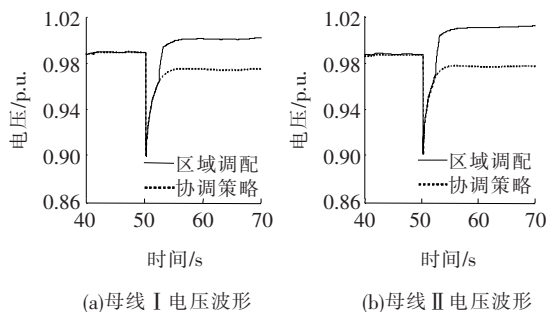


图20 工况8下母线Ⅰ和Ⅱ电压波形

Figure 20 Voltage amplitude variations of bus I and II under condition 8

4 结语

该文考虑DFIG无功限度和调控机制,针对目标节点电压的波动,设计了SVG和风电场的协调控制策略以及区域无功调配策略,使目标节点电压能精准把控在合格指标内,得出如下结论。

1)详细分析了DFIG理论无功限度,考虑过电流影响,进一步准确给出了DFIG的无功限度。通过算例,验证了大负荷情况下,考虑过电流时无功下限会减少 $8\%\sim 20\%$ 。

2)在精确控制DFIG机组无功限度的基础上,改进了DFIG内部控制结构,使其实现先定子侧后GSC,再弃风减载的DFIG无功控制策略。通过仿真验证了其相比传统控制更大程度的发掘了DFIG的无功补偿能力,且对有功影响更小。

3)提出以SVG为灵活调控基础,风电场为无功支撑的方案,给出了SVG协调风电场的无功补

偿方案策略。通过负荷引起的电压波动,仿真验证了该策略相比传统控制可提高目标节点的电压合格率和精度,且提高了SVG的无功补偿裕度,使系统更为稳定。

4)考虑多种区域中无功储量的影响因素,计算灵敏度、无功裕度和 M_i 参数等,评估区域无功补偿能力,设计区域无功调配策略,进一步完善电压精细化调控策略,并在两区域并网模型中验证该策略可在区域之间或电网联络处进行无功调配,可提高整个区域电压精度与合格率,证明新能源高渗透率区域也可达到较高电压质量。

参考文献:

- [1] 温泽之,彭春华,孙惠娟. 计及风电置信风险成本的多目标最优潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24):36-43.
WEN Zezhi, PENG Chunhua, SUN Huijuan. Multi-objective optimal power flow calculation considering wind power confidence risk cost[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24):36-43.
- [2] 赖宇阳,肖勇,郑楷洪,等. DSTATCOM配置与整定的多目标协调优化[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1):61-67.
LAI Yuyang, XIAO Yong, ZHENG Kaihong, et al. Multi objective coordinated optimization of DSTATCOM configuration and setting in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1):61-67.
- [3] 温栋,贾嵘,韩杰,等. 风电大规模集中并网下无功补偿计算[J]. 高压电器, 2019, 55(4):193-197.
WEN Dong, JIA Rong, HAN Jie, et al. Reactive power compensation calculation for large-scale centralized wind power grid integration[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4):193-197.
- [4] 刘华志,李永刚,王优胤,等. 无功电压优化对新能源消纳的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2):646-653.
LIU Huazhi, LI Yonggang, WANG Youyin, et al. Influence about reactive power voltage optimization on the dissipation of new energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2):646-653.
- [5] 余浩,肖彭瑶,林勇,等. 大规模海上风电高电压穿越研究进展与展望[J]. 智慧电力, 2020, 48(3):30-38.
YU Hao, XIAO Pengyao, LIN Yong, et al. Review on high voltage ride-through strategies for offshore doubly-

- fed wind farms[J]. *Smart Power*, 2020, 48(3):30-38.
- [6] 杨源, 阳熹, 谭江平, 等. 海上风电场无功配置优化方案[J]. *中国电力*, 2020, 53(11):195-201.
YANG Yuan, YANG Xi, TAN Jiangping, et al. Optimization of reactive power configuration for offshore wind farms[J]. *Electric Power*, 2020, 53(11):195-201.
- [7] 孙健, 袁晓冬, 刘建坤, 等. 智能配电网无功电压控制系统研究及应用[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(5):1-9.
SUN Jian, YUAN Xiaodong, LIU Jiankun, et al. Research and application of the reactive power and voltage control system in the smart distribution network[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(5):1-9.
- [8] 鲁改凤, 欧钰雷, 杜帅, 等. 基于改进 HPSO 算法的风电场内部无功优化研究[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(10):36-42.
LU Gaifeng, OU Yulei, DU Shuai, et al. Research on internal reactive power optimization of wind farm based on the improved HPSO algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(10):36-42.
- [9] 厉伟, 颜宁, 邢作霞, 等. 分散式风电场 DFIG 与 SVC 协调无功控制策略[J]. *电工电能新技术*, 2014, 33(7):18-22.
LI Wei, YAN Ning, XING Zuoxia, et al. Strategy of reactive power control for distributed wind farm operation using SVC and DFIG[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2014, 33(7):18-22.
- [10] 李欣然, 邓威, 黄际元, 等. 考虑不确定性分布式电源影响的配电网无功补偿配置方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2012, 27(1):27-32.
LI Xinran, DENG Wei, HUANG Jiyuan, et al. Allocation method of reactive power compensation in distribution networks considering distributed uncertainty generation[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2012, 27(1):27-32.
- [11] 秦涛, 吕跃刚, 徐大平. 采用双馈机组的风电场无功功率控制技术[J]. *电网技术*, 2009, 33(2):105-110.
QIN Tao, LV Yuegang, XU Daping. Reactive power control of wind farm adopting doubly-fed induction generators[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(2):105-110.
- [12] 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 on statcom[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(25):23-28.
- [13] 王松, 李庚银, 周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16):2714-2720.
WANG Song, LI Gengyin, ZHOU Ming. The reactive power adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction generator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16):2714-2720.
- [14] 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):82-89.
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):82-89.
- [15] 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]. *Proceeding of the CSEE*, 2007, 27(9):77-82.
- [16] Mihet-Popa L, Blaabjerg F, Boldea I. Wind turbine generator modeling and simulation where rotational speed is the controlled variable[J]. *IEEE Transaction on Industry Application*, 2004, 40(1):3-10.
- [17] 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.
SHEN Hong, WANG Weisheng, DAI Huizhu. Reactive power limit of variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(11):60-63.
- [18] 赵晶晶, 胡晓光, 吕雪, 等. 含 STATCOM 的双馈电机风电场无功电压协调控制策略[J]. *电工电能新技术*, 2016, 35(10):17-22.
ZHAO Jingjing, HU Xiaoguang, LV Xue, et al. Research on coordination control strategy of DFIG wind farm with crowbar circuit[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(10):17-22.
- [19] Xu L F, Chen T H, Yang L, et al. Reactive power and voltage coordinated control of wind farm for parallel running STATCOM[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, Chengdu, China: IEEE, 2019.
- [20] GB/T 19963—2011. 风电场接入电力系统技术规定[S].