DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210479

基于模型预测控制的风电场故障穿越有功无功优化控制策略

崔 挺[1]，李雪萍[2]，颜 畅[2]，黄 晟[2]，沈非凡[2]，王 玎[1]

（1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院，湖南 长沙 410007；
2. 湖南大学电气与信息工程学院，湖南 长沙 410082）

摘要：电网故障易造成并网风电场内风力发电机端电压骤变进而导致风力发电机跳闸，威胁风电场的安全运行。提出一种基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的风电场故障穿越有功无功优化控制策略。首先，基于下垂控制，根据并网点(Point of Common Coupling, PCC)电压得出故障下的风电场总有功无功参考值。其次，基于风电场的预测状态空间模型与功率−电压灵敏度计算公式，建立以最小化各风力发电机端电压波动为优化目标的基于 MPC 的优化问题数学模型，求解得到各风力发电机有功无功参考值。在深度故障下，协调控制静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)补偿系统无功缺额以维持 PCC 电压稳定。仿真结果表明，所提控制策略能将 PCC 点电压与 WT 端电压快速有效地稳定在可行范围内，提升风电场的故障穿越能力。

关键词：风电场；故障穿越控制；有功无功协调；模型预测控制；静止无功发生器

Active and reactive power optimization control strategy for wind farm fault ride-through based on model predictive control

CUI Ting[1], LI Xueping[2], YAN Chang[2], HUANG Sheng[2], SHEN Feifan[2], WANG Ding[1]

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Grid events may cause a sudden change in the wind turbine terminal of a grid-connected wind farm, resulting in wind turbine trip, thereby threatening safe operation. To solve this problem, an active and reactive power optimization control strategy for wind farm fault ride-through based on model predictive control (MPC) is proposed. First, the total active and reactive power reference value of the wind farm under fault is obtained through droop control based on the point of common coupling (PCC) voltage. Secondly, based on a prediction state space model of the wind farm and a power-voltage sensitivity calculation formula, the mathematical model of the optimization problem based on MPC is established to minimize the voltage fluctuation at each wind turbine terminal. This problem is solved to obtain the active and reactive power reference value of each wind turbine. In the case of deep faults, the Static Var Generator (SVG) control is coordinated to compensate for the system reactive power shortage to maintain the stability of the PCC voltage. The simulation results show that the proposed control strategy can quickly and effectively stabilize the PCC point voltage and the wind turbine terminal voltage within a reasonable range, improving the fault ride-through capability of the wind farm.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077065).

Key words: wind farm; fault ride-through control; active and reactive power coordination; MPC; static var generator

0 引言

随着并网风电场规模以及风力渗透率的不断增长，风电场对电网电压支撑能力弱，无功电压问题日益突出[1-3]，风电场的安全运行和辅助服务受到了广泛的关注[3-6]。电网故障时电网电压会发生骤变，导致风电场并网点电压与风机端电压随电网电压的变化产生强烈的波动，严重时会造成风机级联跳闸引起大规模风机脱网事件，威胁风电场的安全，进

基金项目：国家自然科学基金项目(52077065)；国网湖南省电力有限公司重点科技项目(5216A5200003)

而对电网产生冲击。因此，研究电网故障下风电场的电压控制策略，将风电场电压维持在规定范围内，是提升风电场故障穿越能力，保证系统安全稳定运行的关键。

目前改善风电场故障穿越能力的电压控制方法主要有两种，即加装外部补偿设备提供无功支撑、利用风机变流器的功率电压协调控制技术维持功率平衡与电压稳定。文献[7]利用基于矢量控制的磁滞电流调节器来减轻转子电流的振荡并提高双馈感应发电机(Double-fed Induction Generator, DFIG)风电机组的故障穿越性能。文献[8]和文献[9]中，合理制定双馈感应发电机的变换器控制策略，在功率极限范围内最大程度地利用 DFIG 的无功输出，为电网提供无功支撑。然而受到 DFIG 无功输出的限制，需要在风电场加装无功补偿装置。文献[10]提出一种 DFIG 结合静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)的电压控制方法，改善了风电场电压暂态性能。而 SVG 的电压对其无功输出影响小，SVG 的动态补偿无功性能优于 SVC[11-13]。一些文献通过研究风电场装备的 SVG 电压控制方案，在风电场电压波动时动态地补偿无功，将风电场并网点电压控制在合理范围内[14-15]。

现有的风电故障穿越研究大多针对单台风机的电压控制。而在实际风电场中，每台风机端电压都受线路阻抗与功率的影响。在故障期间，需要协调控制风电场内所有风机的功率以稳定各风机端电压。已有不少学者对风电场无功电压控制策略进行了广泛的研究[16-21]。在文献[17]和文献[18]中，根据风电场 PCC 点电压计算风电场的无功需求，并按基于最大无功功率比例与下垂控制等方法给所有风机分派无功功率。文献[19]提出了一种基于模型预测控制的自主风电场电压控制器，优化风电场的无功分布，防止电压越限。文献[20]和文献[21]中提出了基于 MPC 的集中电压控制策略，以最小化 VSC-HVDC 连接的海上风电场的电压偏差，并研究了风机和各种具有不同时间尺度的无功补偿设备之间的最佳协调控制。

但是实际风电场网络的电压等级较低，线路阻抗较大，因此风机的有功注入对风电场中各母线电压的影响较大[22]。传统风机通常保持在最大功率点运行，风机的无功输出能力受限，在电压波动较大时，不能充分发挥风机自身的无功调压能力。文献[23-25]中所提的风电并网电压优化控制方案中，综合考虑了风机无功与有功注入对风电场电压的影响，但仅考虑了风电场稳定运行情况。所以为了提升风电场故障期间的无功调节能力，避免风机处于无功极限运行状态，保留一定无功安全裕量，故障时有必要调节风机有功功率对风电场中各母线电压进行有效控制。

本文提出了一种基于模型预测控制的风电场故障穿越有功无功优化控制策略，分析了风电场功率、电压特性，推导了电压灵敏度计算方法，建立了风电场的预测状态空间模型。首先，基于下垂控制根据 PCC 点电压得出故障下的风电场总有功及无功参考值；其次，建立以最小化各风机电压波动为优化目标的基于 MPC 的优化问题数学模型，求解得到各风机有功及无功参考值。此外，考虑了电网故障程度较严重时，协调控制 SVG 补偿系统无功缺额以维持 PCC 点电压稳定。

1　风电场拓扑及故障下电压特性分析

1.1　并网风电场的拓扑结构

具有辐射状拓扑的风电场结构如图 1 所示[25]，风力发电机产生的电能由中压馈线收集，并通过高压/中压变压器汇入并网点 PCC 松弛母线，再经电缆传输至外部电网。

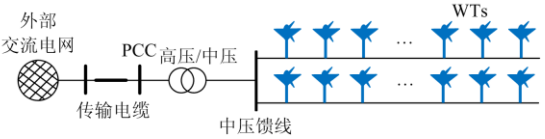


图 1　风电场结构图

Fig. 1 Structure of wind farm

1.2　风机故障穿越要求及电压特性分析

我国针对新能源发电机组的故障穿越规定如图 2 所示。风机需要在规定的低电压故障穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)与高电压故障穿越(High Voltage Ride Through, HVRT)边界范围内持续一段时间并网运行，一旦超出设定的边界，则风机从电网切出。

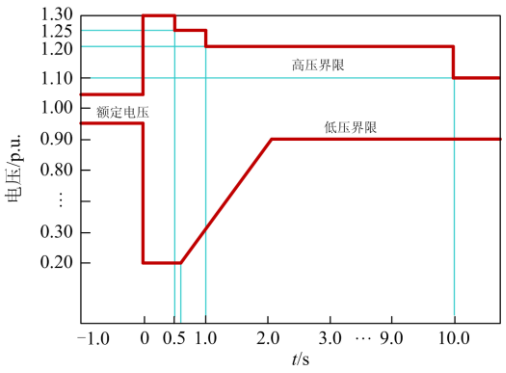
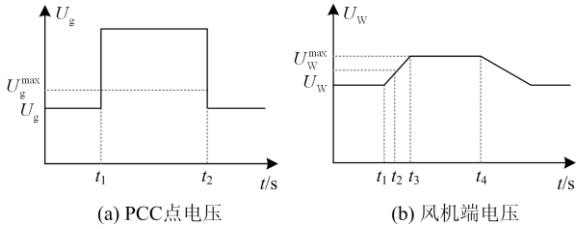


图 2　故障穿越发电机组电压规定

Fig. 2 Voltage curve regulations for fault ride-through generator

以高电压故障为例，当电网电压骤升时，风机端电压随之上升，达到其电压幅值上限后，风机控制器需要采取控制措施调整风机端电压幅值，使其始终处于 HVRT 边界电压以下，保证风电场不脱网运行。风机在 HVRT 过程中端电压的时域响应特性如图 3 所示。假定 t_1 时刻电网电压突然升高并超出其电压上限 $U_{\mathrm{g}}^{\max}$，设 $U_{\mathrm{g}}^{\max}=1.1U_{\mathrm{rated}}$，$U_{\mathrm{rated}}$ 为电网额定电压。风机端电压 U_{W} 也开始增大，在 t_2 时刻增大至其上限值 $U_{\mathrm{W}}^{\max}$，此时风机控制器控制风机调整其无功功率以降低风机端电压，在电网电压与风机控制器的共同影响下，风机端电压在 t_3 时刻达到平衡，电压维持稳定直至电网故障在 t_4 时刻结束。



(a) PCC点电压　　(b) 风机端电压

图 3 HVRT 期间风机端电压时域响应图

Fig. 3 Schematic response curves of wind farm for HVRT

2 风电场功率调节对电压控制的影响

由于风电场中集电线路 R/X 比值较高，风电场中的节点电压除了受到无功功率的影响之外，还受到有功功率的影响。故障下风电场功率调整策略需要考虑功率调节对电压的影响。

2.1 风机有功无功电压调节特性分析

图 4 表示辐射状风电场功率潮流图，风电场由一组 $N=\{s,c,\mathrm{L},i,j,k,\mathrm{L},N_{\mathrm{W}}\}$ 母线组成的径向辐射状网络。图中，s 和 c 分别表示风电场的松弛母线与集电母线，其中，$P_{\mathrm{wt},j}$ 与 $Q_{\mathrm{wt},j}$ 分别表示风力发电机注入节点 j 的有功及无功功率，$P_{i,j}$ 与 $Q_{i,j}$ 分别为线路有功及无功功率，$z_{ij}=r_{ij}+x_{ij}$ 为线路阻抗，u_i 为节点 i 的电压幅值。电压降落的计算公式为

$$\Delta u=u_j-u_i=-\frac{P_{ij}r_{ij}+Q_{ij}x_{ij}}{u_j} \tag{1}$$

线路功率方程为

$$\begin{cases}-P_{\mathrm{wt},i}=P_{ij}-\sum\limits_{k:(j,k)\in\varepsilon}P_{jk}\\ -Q_{\mathrm{wt},i}=Q_{ij}-\sum\limits_{k:(j,k)\in\varepsilon}Q_{jk}\end{cases} \tag{2}$$

结合式(1)与式(2)，可得到风力发电机注入功率后 u_j 的计算公式为

$$u_j=u_i-\frac{(\sum\limits_{k:(j,k)\in\varepsilon}P_{jk}-P_{\mathrm{wt},i})r_{ij}+(\sum\limits_{k:(j,k)\in\varepsilon}Q_{jk}-Q_{\mathrm{wt},i})x_{ij}}{u_j} \tag{3}$$

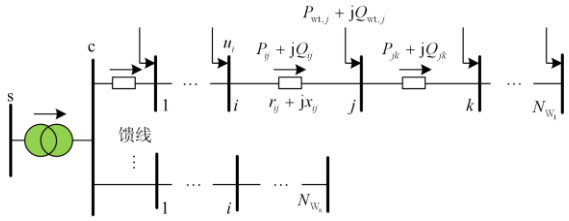


图 4 风电场功率潮流图

Fig. 4 Diagram of wind farm power flow

节点电压值的变化与线路上传输的有功功率、无功功率以及线路阻抗都有关，当线路中 R/X 比值较高时，有功功率与无功功率变化同样的量，调节线路有功功率能够使得电压变化更大。

得到风电场某一馈线上集电母线电压关于其相邻节点 1 的电压灵敏度计算公式为

$$\frac{\partial u_1}{\partial u_{\mathrm{c}}}=\frac{u_{\mathrm{c}}}{2u_1-u_{\mathrm{c}}}=\frac{1}{2-u_{\mathrm{c}}/u_1} \tag{4}$$

令 $\delta=u_{\mathrm{c}}/u_1$，表示节点 1 电压与集电母线电压的比值，风电场中馈线的电抗为感性，此时有 $1<\delta<2$，$\mathrm{d}u_1/\mathrm{d}u_{\mathrm{c}}>1$，故 u_{c} 也对 u_1 有较大影响，而风电场内各节点电压又受相邻节点电压的影响，因此控制风电场的并网点电压的稳定有利于风电场内部各节点电压的稳定。

2.2 辐射状网络拓扑的风电场电压灵敏度计算

电压-功率灵敏度能有效反映风电场线路阻抗的影响。基于功率-电压灵敏度，调节风机出力，可有效改善风电场电压分布。

节点的注入功率与电压的关系为

$$\dot{\boldsymbol{S}}_i^{*}=\dot{\boldsymbol{U}}_i^{*}\sum_{j\in S\cup N_{\mathrm{W}}}\boldsymbol{Y}_{ij}\dot{\boldsymbol{U}}_j \tag{5}$$

式中：$\dot{\boldsymbol{U}}_i@U_i\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_i}$，$\forall i\in S\cup N_{\mathrm{W}}$ 表示电压向量；$\dot{\boldsymbol{S}}_i@P_i+\mathrm{j}Q_i$，$\forall i\in N_{\mathrm{W}}$ 表示注入复功率；$\boldsymbol{Y}_{ij}=G_{ij}+\mathrm{j}B_{ij}$ 表示网络导纳矩阵；$\dot{\boldsymbol{S}}_i^{*}$ 和 $\dot{\boldsymbol{U}}_i^{*}$ 分别表示 $\dot{\boldsymbol{S}}_i$ 和 $\dot{\boldsymbol{U}}_i$ 的共轭；S 表示松弛节点集合；N_{W} 表示 PQ 节点集合。

在式(5)两边分别求关于 P_l、Q_l $(\forall l\in N_{\mathrm{W}})$ 的偏微分：

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\dot{\boldsymbol{S}}_i^{*}}{\partial P_l}=\frac{\partial(P_i+\mathrm{j}Q_i)}{\partial P_l}=\\ &\frac{\partial\dot{\boldsymbol{U}}_i^{*}}{\partial P_l}\sum_{j\in S\cup N_{\mathrm{W}}}\boldsymbol{Y}_{ij}\dot{\boldsymbol{U}}_j+\dot{\boldsymbol{U}}_i^{*}\sum_{j\in N_{\mathrm{W}}}\boldsymbol{Y}_{ij}\frac{\partial\dot{\boldsymbol{U}}_j}{\partial P_l}=\begin{cases}1,i=l\\0,i\neq l\end{cases}\end{aligned} \tag{6}$$

$$\frac{\partial \dot{\boldsymbol{S}}_i^*}{\partial Q_l}=\frac{\partial(P_i+\mathrm{j}Q_i)}{\partial Q_l}= \frac{\partial \dot{\boldsymbol{U}}_i^*}{\partial Q_l}\sum_{j\in S\cup N_{\mathrm{W}}}\dot{\boldsymbol{Y}}_{ij}\dot{\boldsymbol{U}}_j+\dot{\boldsymbol{U}}_i^*\sum_{j\in N_{\mathrm{W}}}\dot{\boldsymbol{Y}}_{ij}\frac{\partial \dot{\boldsymbol{U}}_j}{\partial Q_l}=\begin{cases}-\mathrm{j}1, i=l\\ 0, i\neq l\end{cases} \tag{7}$$

式(6)关于 $\partial\dot{\boldsymbol{U}}_i^*/\partial P_l$ 和 $\partial\dot{\boldsymbol{U}}_i/\partial P_l$ 是线性的，式(7)关于 $\partial\dot{\boldsymbol{U}}_i^*/\partial Q_l$ 和 $\partial\dot{\boldsymbol{U}}_i/\partial Q_l$ 是线性的，可得到任意的 $l\in N_{\mathrm{W}}$ 的 $2N_{\mathrm{W}}$ 个线性方程组，其中包括 $2N_{\mathrm{W}}$ 个变量，$\partial\dot{\boldsymbol{U}}_i^*/\partial P_l$、$\partial\dot{\boldsymbol{U}}_i/\partial P_l$ 与 $\partial\dot{\boldsymbol{U}}_i^*/\partial Q_l$、$\partial\dot{\boldsymbol{U}}_i/\partial Q_l$ 具有唯一解。根据方程组的解，可以求出电压-有功灵敏度以及电压-无功灵敏度：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial U_i}{\partial P_l}=\dfrac{1}{U_i}\mathrm{Re}\left\{\dot{\boldsymbol{U}}_i^*\dfrac{\partial \dot{\boldsymbol{U}}_j}{\partial P_l}\right\}\\ \dfrac{\partial U_i}{\partial Q_l}=\dfrac{1}{U_i}\mathrm{Re}\left\{\dot{\boldsymbol{U}}_i^*\dfrac{\partial \dot{\boldsymbol{U}}_j}{\partial Q_l}\right\}\end{cases} \tag{8}$$

3　基于 MPC 的风电场故障穿越优化控制

当电网发生故障导致风电场内母线电压波动时，风电场中央控制器应快速采取动作调控电压，防止风力发电机电压越限。故障程度较深时，风力发电机的无功调节能力容易达到上限，这时需要降低风力发电机的有功输出以扩大无功调节裕度，同时协调 SVG 电压控制，控制 PCC 电压在可行范围内，保障风电场安全运行。

3.1　风电场故障穿越优化控制策略

风电场故障穿越优化控制框图如图 5 所示。

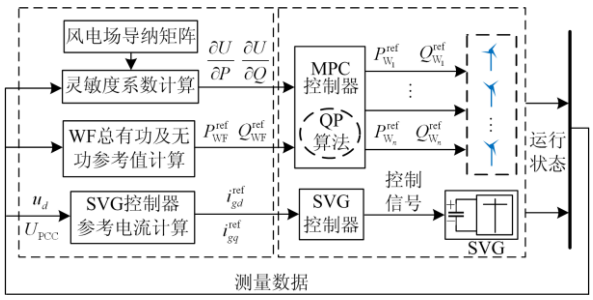


图 5　风电场故障穿越优化控制框图

Fig. 5 Diagram of wind farm optimized control during FRT

图 5 中，第一控制阶段根据故障下测得的 PCC 电压利用下垂控制得出风电场总有功无功参考值，第二个控制阶段优先利用风机本身提供无功支撑，将得到的风电场总功率参考优化的分配给每台风机，保证故障期间风力发电机端电压在可行范围内。深度故障下 SVG 参与调压，根据系统无功缺额计算 SVG 控制器的参考电流。

电网故障期间，风电场的 PCC 电压最容易受到影响，电压波动最大，将 PCC 电压控制在规定范围内是风电场故障穿越的重要前提，同时有助于稳定各风力发电机端电压。调节风电场中各风机输出有功及无功功率可有效控制并网点电压。在 PCC 点处采用下垂控制能快速自适应地进行功率电压调节，在风电场故障穿越上显示出了优越性。

因此，故障时在风电场并网点处分别通过有功/无功-电压下垂曲线来得到风电场总参考有功与无功功率，有功-电压下垂控制如图 6 所示。

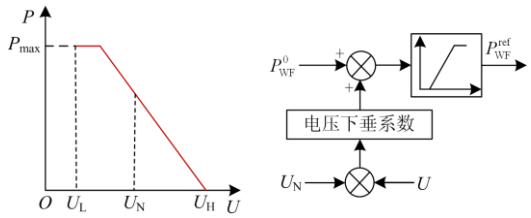


图 6　有功电压下垂控制

Fig. 6 Active power voltage droop control

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{WF}}^{\mathrm{ref}}&=\lambda(U_{\mathrm{PCC}}-U_{\mathrm{N}})+P_{\mathrm{WF}}^{0}\\ Q_{\mathrm{WF}}^{\mathrm{ref}}&=\alpha(U_{\mathrm{PCC}}-U_{\mathrm{N}})+Q_{\mathrm{WF}}^{0}\end{aligned} \tag{9}$$

式中：λ 与 α 分别为有功/无功-电压下垂系数；$P_{\mathrm{WF}}^{\mathrm{ref}}$ 与 $Q_{\mathrm{WF}}^{\mathrm{ref}}$ 分别为风电场总参考有功及无功功率；U_{PCC} 为风电场并网点电压测量值，$U_{\mathrm{PCC}}\in[U_{\mathrm{L}},U_{\mathrm{H}}]$；$U_{\mathrm{N}}$ 为电压额定值；$P_{\mathrm{WF}}^{0}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{W}}}P_{\mathrm{W}_i}^{0}$，$Q_{\mathrm{WF}}^{0}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{W}}}Q_{\mathrm{W}_i}^{0}$，$P_{\mathrm{W}_i}^{0}$ 与 $Q_{\mathrm{W}_i}^{0}$ 分别为风力发电机各控制周期初始测量值。风电场的无功出力范围为 $Q_{\mathrm{WF}}^{\min}\leqslant Q_{\mathrm{WF}}^{\mathrm{ref}}\leqslant Q_{\mathrm{WF}}^{\max}$。其中，

$$\begin{cases}Q_{\mathrm{WF}}^{\min}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{W}}}\left(Q_{\mathrm{is}}^{\min}-\sqrt{(S_{\mathrm{ig}}^{\max})^2-(sP_{\mathrm{is}})^2}\right)\\ Q_{\mathrm{WF}}^{\max}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{W}}}\left(Q_{\mathrm{is}}^{\min}-\sqrt{(S_{\mathrm{ig}}^{\max})^2-(sP_{\mathrm{is}})^2}\right)\end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases}Q_{\mathrm{s}}^{\min}=-\dfrac{3U_{\mathrm{s}}^2}{2X_{\mathrm{s}}}-\sqrt{\left(U_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{rmax}}\dfrac{3X_{\mathrm{e}}}{2X_{\mathrm{s}}}\right)^2-P_{\mathrm{s}}^2}\\ Q_{\mathrm{s}}^{\max}=-\dfrac{3U_{\mathrm{s}}^2}{2X_{\mathrm{s}}}+\sqrt{\left(U_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{rmax}}\dfrac{3X_{\mathrm{e}}}{2X_{\mathrm{s}}}\right)^2-P_{\mathrm{s}}^2}\end{cases} \tag{11}$$

式中：P_{s} 和 Q_{s} 分别为 DFIG 定子侧有功及无功输出，$Q_{\mathrm{s}}^{\min}$ 和 $Q_{\mathrm{s}}^{\max}$ 分别为 DFIG 定子侧无功输出的下限和上限值；下标 i 表示第 i 台风机；I_{rmax} 为 DFIG 转子侧电流最大值；U_{s} 为 DFIG 定子侧端电压；X_{s} 与 X_{e} 分别为定子漏抗与励磁感抗；$S_{\mathrm{g}}^{\max}$ 为网侧变流器容

量；s 为转差率。在电网故障情况下，适当降低风电场的有功出力，可以增大风机的可调无功裕量，避免无功出力达到极限。

当 $|1-U_{\mathrm{PCC}}|>10\%$ 时，为了保证风机的功率安全裕量，系统总的无功缺额由 SVG 提供。SVG 控制框图如图 7 所示，该控制包含直流电压控制与无功功率控制两部分，在提供所需无功的同时维持 SVG 直流电压的稳定。

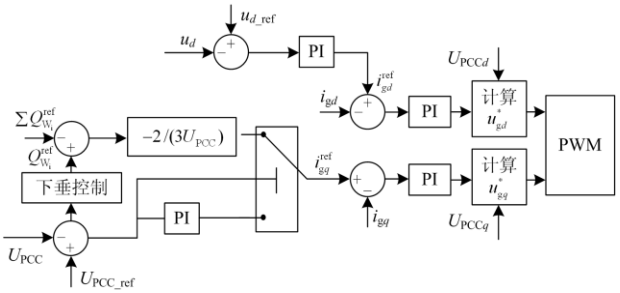


图 7 SVG 控制框图

Fig. 7 SVG control block diagram

SVG 无功电流参考值计算公式为

$$i_{gq}^{\mathrm{ref}}=-\frac{2}{3U_{\mathrm{PCC}}}\left(Q_{\mathrm{WF}}^{\mathrm{ref}}-\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{W}}}Q_{\mathrm{W}_i}^{\mathrm{ref}}\right) \tag{12}$$

3.2 风电场电压优化控制

分别采用有功、无功控制环对风力发电机进行解耦控制。考虑到控制与通信系统的动态响应特征，可以将风力发电机的功率控制环简化为一阶滞后函数[15]，如式(13)所示。其中，$T_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}$、$T_{\mathrm{W}}^{\mathrm{Q}}$ 分别是风机有功功率控制环与无功功率控制环的时间常数，通常取 1~10 s。

$$\begin{cases}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}=\dfrac{1}{1+T_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}s}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}\\ \Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}=\dfrac{1}{1+T_{\mathrm{W}}^{\mathrm{Q}}s}\Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}\end{cases} \tag{13}$$

得到风机有功及无功的增量状态方程为

$$\begin{cases}\Delta\dot{\boldsymbol{P}}_{\mathrm{W}}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{Q}}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}\\ \Delta\dot{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{W}}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{Q}}\Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{Q}}\Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}\end{cases} \tag{14}$$

式中，$\Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}$、$\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}$ 分别为控制周期内其当前测量值与初始值之差，$\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}=\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{0}$，$\Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}-\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}^{0}$。其中，

$$\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}=[\Delta P_{\mathrm{W}_1},\Delta P_{\mathrm{W}_2},\mathrm{L}\ ,\Delta P_{\mathrm{W}_n}]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

$$\Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}=[\Delta Q_{\mathrm{W}_1},\Delta Q_{\mathrm{W}_2},\mathrm{L}\ ,\Delta Q_{\mathrm{W}_n}]^{\mathrm{T}} \tag{16}$$

$$\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}=[\Delta P_{\mathrm{W}_1}^{\mathrm{ref}},\Delta P_{\mathrm{W}_2}^{\mathrm{ref}},\mathrm{L}\ ,\Delta P_{\mathrm{W}_n}^{\mathrm{ref}}]^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

$$\Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}=[\Delta Q_{\mathrm{W}_1}^{\mathrm{ref}},\Delta Q_{\mathrm{W}_2}^{\mathrm{ref}},\mathrm{L}\ ,\Delta Q_{\mathrm{W}_n}^{\mathrm{ref}}]^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}=-\mathrm{diag}[1/T_{\mathrm{W}_1}^{\mathrm{P}},1/T_{\mathrm{W}_2}^{\mathrm{P}},\mathrm{L}\ ,1/T_{\mathrm{W}_n}^{\mathrm{P}}] \tag{19}$$

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{Q}}=-\mathrm{diag}[1/T_{\mathrm{W}_1}^{\mathrm{Q}},1/T_{\mathrm{W}_2}^{\mathrm{Q}},\mathrm{L}\ ,1/T_{\mathrm{W}_n}^{\mathrm{Q}}] \tag{20}$$

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}=\mathrm{diag}[1/T_{\mathrm{W}_1}^{\mathrm{P}},1/T_{\mathrm{W}_2}^{\mathrm{P}},\mathrm{L}\ ,1/T_{\mathrm{W}_n}^{\mathrm{P}}] \tag{21}$$

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{Q}}=\mathrm{diag}[1/T_{\mathrm{W}_1}^{\mathrm{Q}},1/T_{\mathrm{W}_2}^{\mathrm{Q}},\mathrm{L}\ ,1/T_{\mathrm{W}_n}^{\mathrm{Q}}] \tag{22}$$

风电场的连续状态空间方程可以表示为

$$\begin{cases}\Delta\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\Delta\boldsymbol{u}\\ \Delta\boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\Delta\boldsymbol{x}\end{cases} \tag{23}$$

其中，

$$\begin{aligned}&\Delta\boldsymbol{x}=\left[\Delta P_{\mathrm{W}_1},\Delta P_{\mathrm{W}_2},\mathrm{L}\ ,\Delta P_{\mathrm{W}_n},\Delta Q_{\mathrm{W}_1},\Delta Q_{\mathrm{W}_2},\mathrm{L}\ ,\Delta Q_{\mathrm{W}_n}\right]^{\mathrm{T}}\\ &\Delta\boldsymbol{u}=\left[\Delta P_{\mathrm{W}_1}^{\mathrm{ref}},\Delta P_{\mathrm{W}_2}^{\mathrm{ref}},\mathrm{L}\ ,\Delta P_{\mathrm{W}_n}^{\mathrm{ref}},\Delta Q_{\mathrm{W}_1}^{\mathrm{ref}},\Delta Q_{\mathrm{W}_2}^{\mathrm{ref}},\mathrm{L}\ ,\Delta Q_{\mathrm{W}_n}^{\mathrm{ref}}\right]^{\mathrm{T}}\\ &\Delta\boldsymbol{y}=\left[\Delta P_{\mathrm{W}_1},\Delta P_{\mathrm{W}_2},\mathrm{L}\ ,\Delta P_{\mathrm{W}_n},\Delta Q_{\mathrm{W}_1},\Delta Q_{\mathrm{W}_2},\mathrm{L}\ ,\Delta Q_{\mathrm{W}_n}\right]^{\mathrm{T}}\\ &\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}&\\&\boldsymbol{A}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{Q}}\end{bmatrix},\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}&\\&\boldsymbol{B}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{Q}}\end{bmatrix},\boldsymbol{C}=\boldsymbol{I}_{2N_{\mathrm{W}}}=\boldsymbol{I}^{2n\times 2n}\end{aligned} \tag{24}$$

设置采样周期为 ΔT_{s}，将连续状态空间方程离散化，得到风电场离散状态方程为

$$\begin{cases}\Delta\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}_d\Delta\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_d\Delta\boldsymbol{u}(k)\\ \Delta\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}\Delta\boldsymbol{x}(k)\end{cases} \tag{25}$$

其中，

$$\boldsymbol{A}_d=\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}\Delta T_{\mathrm{s}}},\boldsymbol{B}_d=\int_0^{\Delta T_{\mathrm{s}}}\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\mathrm{d}t \tag{26}$$

故障期间并网点电压与风力发电机端电压必须维持在规定范围内才能保证风机不脱网，风电场实现故障穿越。为了实现故障穿越期间风机端电压的矫正，得到最优的电压分布，优化目标设为最小化风机端电压与额定值 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}$ 的偏差，即

$$F_1=\min\left(\sum_{k=1}^{N_p}\left\|\boldsymbol{U}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{pre}}(k)-\boldsymbol{U}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{ref}}\right\|^2\right) \tag{27}$$

式中，$\boldsymbol{U}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{pre}}(k)=\left[U_{\mathrm{W}_1}^{\mathrm{pre}}(k),U_{\mathrm{W}_2}^{\mathrm{pre}}(k),\mathrm{L}\ ,U_{\mathrm{W}_{N_{\mathrm{W}}}}^{\mathrm{pre}}(k)\right]^{\mathrm{T}}$ 为第 k 次预测周期内风机端电压预测值向量。风机端电压的大小与其有功及无功功率输出有关，根据网络潮流方程，利用灵敏度系数，得到风机端电压的线性化计算公式为

$$U_{\mathrm{W}_i}^{\mathrm{pre}}(k)=U_{\mathrm{W}_i}(t_0)+\frac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{T}}}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}(k)+\frac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{T}}}\Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}(k) \tag{28}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{T}}}=\left[\dfrac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial P_{\mathrm{W}_1}},\dfrac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial P_{\mathrm{W}_2}},\mathrm{L}\ ,\dfrac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial P_{\mathrm{W}_{N_{\mathrm{W}}}}}\right]\\ \dfrac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial\boldsymbol{Q}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{T}}}=\left[\dfrac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial Q_{\mathrm{W}_1}},\dfrac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial Q_{\mathrm{W}_2}},\mathrm{L}\ ,\dfrac{\partial U_{\mathrm{W}_i}}{\partial Q_{\mathrm{W}_{N_{\mathrm{W}}}}}\right]\end{cases} \tag{29}$$

第二个目标是在满足控制策略第一阶段的风电场总功率要求的前提下，各风机的有功功率尽量按等比例进行分配，即

$$F_2=\min\Big(\sum_{k=1}^{N_p}\left\|\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}(t_0)+\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}(k)-\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{PD}}\right\|^2\Big) \tag{30}$$

式中：$\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}(t_0)$是该预测周期的各风机有功输出初始测量值列向量；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{PD}}$为等比例分配下的风机有功参考值列向量，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{PD}}=\boldsymbol{P}_{\mathrm{WF}}^{\mathrm{ref}}/N_{\mathrm{W}}$，$N_{\mathrm{W}}$为风机个数。总目标函数为

$$\min\left(\boldsymbol{W}_{\mathrm{W}}F_1+\boldsymbol{W}_{\mathrm{PD}}F_2\right) \tag{31}$$

其中，

$$\begin{cases}\boldsymbol{W}_{\mathrm{W}}=\mathrm{diag}\left[W_{\mathrm{W}_1},\mathrm{L}\ ,W_{\mathrm{W}_n}\right]\\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{PD}}=\mathrm{diag}\left[W_{\mathrm{PD}1},\mathrm{L}\ ,W_{\mathrm{PD}n}\right]\end{cases} \tag{32}$$

式中，$\boldsymbol{W}_{\mathrm{W}}$、$\boldsymbol{W}_{\mathrm{PD}}$分别为对应于$F_1$、$F_2$的权重系数，均大于0。

根据风机可用功率范围，结合式(10)确定系统控制变量的不等式约束条件为

$$\begin{cases}0\leqslant P_{\mathrm{W}_i}(k)\leqslant\bar{P}_{\mathrm{W}_i}(k)\\ \underline{Q}_{\mathrm{W}_i}(k)\leqslant Q_{\mathrm{W}_i}(k)\leqslant\bar{Q}_{\mathrm{W}_i}(k)\end{cases} \tag{33}$$

式中：$\bar{P}_{\mathrm{W}_i}$表示风机可用有功功率；$\underline{Q}_{\mathrm{W}_i}$与$\bar{Q}_{\mathrm{W}_i}$分别为风机无功功率上下限。根据上一节分析，风机无功可用范围与风机有功输出相关，取$\bar{Q}_{\mathrm{W}_i}=-\underline{Q}_{\mathrm{W}_i}=\sqrt{{S_{\mathrm{WTG}}}^2-{\bar{P}_{\mathrm{W}_i}}^2}$，$S_{\mathrm{WTG}}$为风机的额定容量。

正常情况下，风电场的总输出功率需满足系统调度的要求；但在故障情况下，根据第一阶段PCC处的下垂控制器计算风电场总的功率参考值，并保证各台风机的有功参考值之和等于风电场总有功参考值，风电场的无功参考值等于所有风机的无功参考值与SVG的无功参考值之和，等式约束条件为

$$P_{\mathrm{WF}}^{\mathrm{ref}}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{W}}}P_{\mathrm{W}_i}^{\mathrm{ref}},\ Q_{\mathrm{WF}}^{\mathrm{ref}}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{W}}}Q_{\mathrm{W}_i}^{\mathrm{ref}}+Q_{\mathrm{SVG}}^{\mathrm{ref}} \tag{34}$$

将上述优化控制问题转化为标准的二次规划问题，利用求解器求解[16]。

风电场MPC控制器框图如图8所示，其中Δy^{pre}为系统输出增量预测值。根据风电场离散状态方程(25)实时预测风机有功及无功输出增量，并利用灵敏度矩阵计算得到目标函数所需变量的值，利用优化算法求解得到系统最优控制变量，作用于风电场，并实时测量其输出状态。

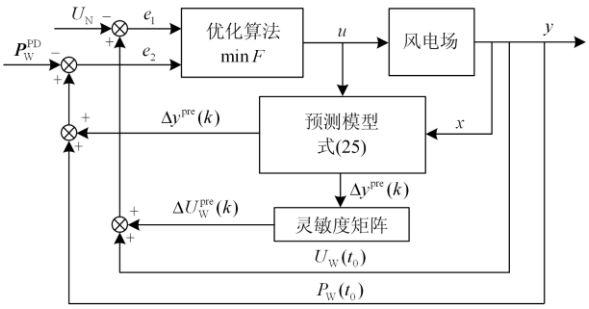


图 8 风电场 MPC 控制框图

Fig. 8 MPC control block diagram of wind farm

4 仿真验证

本文将配备64×6.25 MW双馈风力发电机组的风电场接入IEEE14节点的电力系统中，在Matlab/Simulink进行仿真验证。设置MPC控制周期为1 s，预测步长为5 s。为了证明所提风电场故障穿越控制策略的有效性，在不同故障情况下对传统基于PD的风电场支撑电网电压控制策略与所提控制策略进行了对比分析。传统PD控制对PCC点的无功采用PI控制得到风电场无功参考值，风电场有功参考值则实时跟踪TSO下发的指令，并且PD控制中各风力发电机有功及无功参考值都根据风电场有功及无功参考指令按风机台数均分得到。传统PD控制无功环PI参数与所提控制策略下垂系数参数表如表1所示。

表 1 传统 PD 控制与所提控制策略参数表

Table 1 Traditional PD control and the proposed control strategy parameter table

方法	参数	PCC 有功环	PCC 无功环
传统 PD 控制方法	K_{P}	—	2.045
	K_{I}	—	80
所提控制方法	$\lvert U_{\mathrm{PCC}}-U_{\mathrm{N}}\rvert<0.1U_{\mathrm{N}}$	0	−2
	$\lvert U_{\mathrm{PCC}}-U_{\mathrm{N}}\rvert\geqslant0.1U_{\mathrm{N}}$	0.6	−7

表1中K_{P}与K_{I}分别表示PD控制方法中的无功环PI控制器的比例系数与积分系数，所提控制方法根据PCC电压与额定电压的差值的大小分别设定不同的有功及无功下垂系数。

在2.5~3 s及5~5.5 s两个时间段分别设置低压故障与高压故障，分别导致PCC点电压变化范围为(0.9~1 p.u.)与(1~1.1 p.u.)。图9为传统PD与本文策略故障下风电场的PCC点电压波形对比图。可以看到采用所提控制策略能有效降低故障造成的PCC点电压波动，响应速度快，并且与传统PD策略相比对电压偏差的控制效果更加显著，同时能有效降

低事故恢复期间出现的冲击电压。

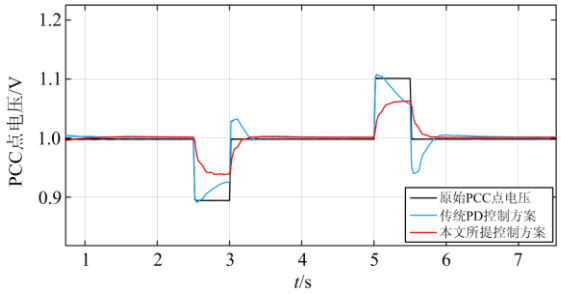


图 9 不同控制策略下 PCC 点电压波形对比图

Fig. 9 PCC point voltage profile comparison with different control schemes

图 10 为离故障点最近的 WT1 的端电压波形。由图可见，故障期间 WT1 端电压骤变，所提策略与传统策略相比，能更好地抑制 WT1 端电压的波动，将其维持在可行域内，运行时间满足故障穿越规定，且在故障后电压恢复期间，电压波动更小，有效抑制了过电压，提升了风机的安全性能。

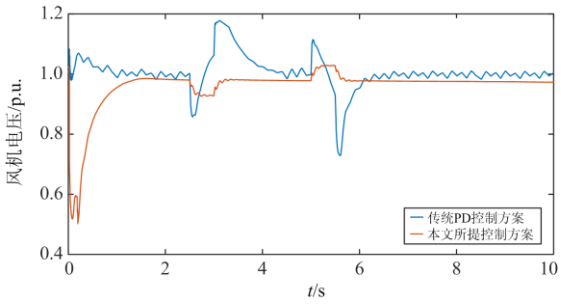


图 10 WT1 端电压

Fig. 10 Voltage profile of WT1

在相同时间设置更深程度的故障引起 PCC 点电压在(0.8~1 p.u.)与(1~1.2 p.u.)间变化，不同控制策略下 PCC 点电压与 WT1 端电压波形如图 11、图 12 所示。可以看到，低压与高压故障期间所提控制策略能分别将 PCC 点电压提升至 0.86 p.u.与降低至 1.12 p.u.左右，而传统策略仅能提升至 0.82 p.u.与降至 1.15 p.u.左右，所提控制策略电压支撑能力更强，故障时风力发电机电压与额定值的偏差更小，能更好地实现风电场的深度故障穿越。

深度故障期间风电场有功及无功变化如图 13、图 14 所示。低压故障时风电场增大总无功输出以提升电压水平，高压故障时风电场吸收无功促进风力发电机电压的降低，故障期间所提控制策略有效降低了风电场有功输出，确保无功出力都保持在最大可用无功范围内，并且留有一定的无功裕量，提高电压恢复速度。

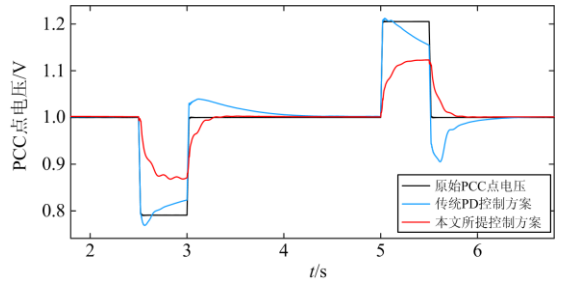


图 11 不同控制策略下 PCC 点电压波形对比图

Fig. 11 PCC point voltage profile comparison with different control schemes

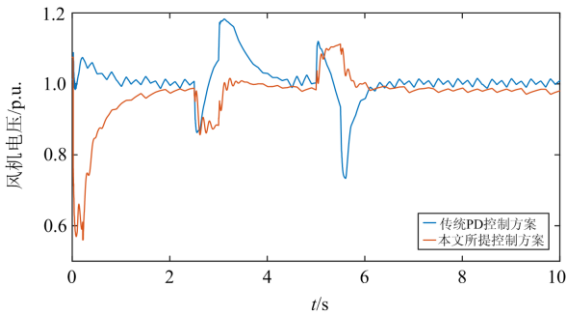


图 12 WT1 端电压波形

Fig. 12 Voltage profile of WT1

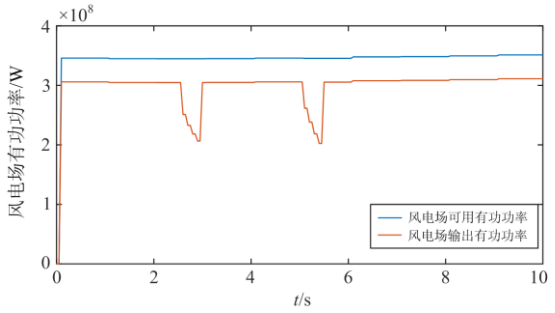


图 13 风电场有功功率

Fig. 13 Active power output of wind farm

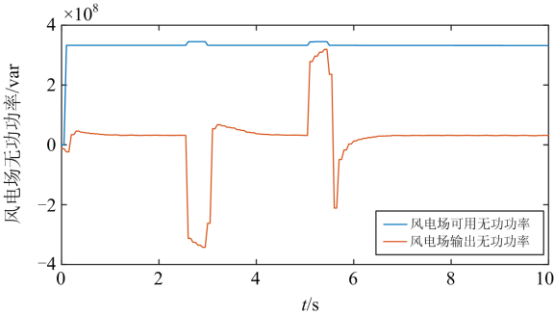


图 14 风电场无功功率

Fig. 14 Reactive power output of wind farm

5　结论

本文提出一种基于模型预测控制的风电场故障穿越有功及无功优化控制策略，通过在 PCC 点采用下垂控制自适应地调节风电场总功率参考值，并结合 SVG 共同调节无功以稳定 PCC 点电压，采用基于 MPC 的控制方法优化风电场内部每个风力发电机的有功及无功输出，将风力发电机端电压快速有效地稳定在可行范围内。仿真结果表明：与传统控制策略相比，所提控制策略在高低压故障中均能更加快速有效地降低 PCC 点电压、风力发电机端电压与额定值的偏差，抑制故障后的冲击电压，同时提升风电场无功裕度，保证故障下风电场的安全可靠运行。

本文仅考虑了 SVG 无功调压设备与风电场的协调控制，没有考虑传统的响应速度较慢的有载调压变压器与电容器、电抗器的投切。若现有风电场同时配备上述设备，如何在不同时间尺度上分组协调控制各调压设备的运行，实现风电场故障穿越，是值得进一步研究的问题。

参考文献

[1] 刘伟. 电网严重故障下的电压稳定应对措施分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 163-170.
LIU Wei. Analysis of voltage stability countermeasures under a severe fault in a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 163-170.

[2] LI W, ZHU M, CHAO P, et al. Enhanced FRT and post-fault recovery control for MMC-HVDC connected offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1606-1617.

[3] XU Da, WU Qiuwei, ZHOU Bin, et al. Distributed multi-energy operation of coupled electricity, heating and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2457-2469.

[4] 张钦智, 王宾, 李琰, 等. 风电场经柔性直流输电系统故障穿越协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 131-138.
ZHANG Qinzhi, WANG Bin, LI Yan, et al. Research on fault crossing coordination control of a wind farm via a flexible direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 131-138.

[5] 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.

[6] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏, 等. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 108-114.
DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU Ruipeng, et al. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 108-114.

[7] SHI M, CHEN X, ZHOU J, et al. Advanced secondary voltage recovery control for multiple HESSs in a droop-controlled DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3828-3839.

[8] 王松, 李庚银, 周明, 等. 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, et al. The reactive power adjusting mechanism and control strategy of doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2714-2720.

[9] 康祎龙, 郑婷婷, 苗世洪, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机系统串联和并联网侧变换器协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 1): 193-204.
KANG Yilong, ZHENG Tingting, MIAO Shihong, et al. Coordinated control strategy of series and parallel grid side converters for DFIG system under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 193-204.

[10] 刘红政, 樊艳芳, 钟显. 考虑风电场暂态电压稳定的无功控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(3): 167-172.
LIU Hongzheng, FAN Yanfang, ZHONG Xian. Reactive power control strategy considering transient voltage stability of wind farms[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 167-172.

[11] MORSHED M J, SARDOUEINASAB Z, FEKIH A. A coordinated control for voltage and transient stability of multi-machine power grids relying on wind energy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 109: 95-109.

[12] 刘伟. 电网严重故障下的电压稳定应对措施分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 163-170.
LIU Wei. Analysis of voltage stability countermeasures under a severe fault in a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 163-170.

[13] 乐健, 周谦, 王曹, 等. 无功补偿设备和分布式电源协同的配电网优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控

制, 2020, 48(18): 38-47.
LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on distributed optimal control strategy for a distribution network based on the cooperation of DGs and Var compensators[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 38-47.

[14] 郑丽平, 匡洪海, 张曙云, 等. TCSC-STATCOM 控制对风电并网系统电压稳定性的改善[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 90-95.
ZHENG Liping, KUANG Honghai, ZHANG Shuyun, et al. Voltage stability improvement of wind power integrated system using TCSC-STATCOM control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 90-95.

[15] 唐杰, 刘白杨, 高士然, 等. 应用于风电场的静止同步补偿器电压控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(11): 81-86.
TANG Jie, LIU Baiyang, GAO Shiran, et al. Voltage control strategy for STATCOM used in wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(11): 81-86.

[16] SAKAMURI J N, RATHER Z H, RIME J, et al. Coordinated voltage control in offshore HVDC connected cluster of wind power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1592-1601.

[17] KARTHIEYA B, SCHUTT R. Overview of wind par control strategies[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 416-422.

[18] 李生虎, 章怡帆, 于新珏, 等. 采用改进下垂控制和双层无功优化的风电场无功均衡分配研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 1-7.
LI Shenghu, ZHANG Yifan, YU Xinyu, et al. Research on balanced reactive power distribution of wind farms with improved droop control and double-layer reactive power optimization[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 1-7.

[19] ZHAO Haoran, WU Qiuwei, GUO Qinglai, et al. Coordinated voltage control of a wind farm based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1440-1451.

[20] GUO Yifei, GAO Houlei, WU Qiuwei, et al. Enhanced voltage control of VSC-HVDC connected offshore wind farms based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 474-487.

[21] ZHANG Baohua, HOU Peng, HU Weihao, et al. A reactive power dispatch strategy with loss minimization for a DFIG based wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 7(3): 914-923.

[22] WANG Z, WANG J, CHEN B, et al. MPC-based voltage/var optimization for distribution circuits with distributed generators and exponential load models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 5(5): 2412-2420.

[23] 张晓朝, 段建东, 石祥宇, 等. 利用 DFIG 无功能力的分散式风电并网有功最大控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2001-2008.
ZHANG Xiaozhao, DUAN Jiandong, SHI Xiangyu, et al. Research of maximum control strategy with dispersed wind power considering reactive capability of DFIG[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2001-2008.

[24] HUANG Sheng, WU Qiuwei, GUO Yifei, et al. Distributed voltage control based ADMM for large-scale wind farm cluster connected to VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 2(11): 584-594.

[25] HUANG Sheng, WU Qiuwei, GUO Yifei, et al. Bi-level decentralized active and reactive power control for large-scale wind farm cluster[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 111: 201-215.

收稿日期：2021-04-23； 修回日期：2021-06-23

作者简介：

崔 挺(1986—)，男，博士，高工，研究方向为电力系统稳定分析与控制；E-mail: cuiting0245@163.com

李雪萍(1993—)，女，通信作者，博士研究生，研究方向为新能源发电系统控制及风电场优化运行与控制；E-mail: lxp1993@hnu.edu.cn

颜 畅(1997—)，男，硕士研究生，研究方向为风电场建模与优化运行控制。E-mail: yanchang@hnu.edu.cn

（编辑 魏小丽）