DFIG风电场经交流 / 柔性直流并网系统最优潮流与 灵敏度分析

李生虎,齐 涛,张 楠,赵慧洁,胡 涛 (合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009)

0 引言

柔性直流输电(VSC-HVDC)具有结构灵活、可 靠性高、输出谐波小等特点,被广泛应用于含双馈感 应发电机(DFIG)等风电机组的并网拓扑结构中。 如何选取VSC-HVDC、DFIG控制变量及量化其潮流 控制能力,成为亟待解决的问题^[1-2]。

对于风电场经交流和柔性直流(AC/VSC-HVDC) 并网系统,若换流站采用下垂控制,下垂系数、换流 站注入的交流有功和无功参考值、DFIG无功设定值 等控制变量,均会影响系统潮流分布。现有文献大 多按事先定值调节潮流[3],无法应对运行条件变化的 情况。通过连续修改参数、比较线路功率和节点电 压^[4],可得不同运行条件下的控制变量最优解,但是 计算效率低。文献[5]利用模糊控制调整下垂系数, 同时达到电压调节和负载分配的目的,但模糊控制 不易定义系统控制目标。文献[6]以网损与电压偏 移最小为目标,通过最优潮流(OPF)求解下垂系数 和换流站注入的交流有功、无功参考值。换流站下 垂控制的局限性在于无法实现定直流电压,当风速 波动较大或电压源型换流器(VSC)选择不同控制方 式时,难以实现功率分配和电压波动之间的均衡。可 考虑加入串联电压源型直流潮流控制器(DCPFC), 以增加系统控制的自由度[7]。文献[8-9]分别针对 直流电网和交直流电网,建立 OPF 模型得到 DCPFC 最优变比,但在优化过程中保持换流站参数不变, DCPFC 控制效果有限。以上文献均未考虑风电接 入。针对DFIG风电场经交直流并网系统,现有文献 大多将DFIG简化,如将风电等效为普通电源^[10]或忽

收稿日期:2019-11-05;修回日期:2020-04-12 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877061)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877061)

略电机损耗,将风力机出力简化为风速线性/二次 函数[11-12],建模准确性存疑。采用优化算法求解含 DCPFC的风电场经交直流并网系统最优控制变量, 其难点在于计及DFIG 详细结构后,其内部损耗与机 端电压(电网潮流)结果相关。针对VSC-HVDC与 DFIG 潮流控制能力和其控制变量相关,可采用灵敏 度分析法。文献[13]基于电压灵敏度法,推导VSC-HVDC系统在不同控制方式下受端系统电压支撑强 度的解析表达,分析 VSC-HVDC 系统对受端系统强 度的影响,但并未考虑换流站采用下垂控制的情况。 文献[14]引入含大规模风电电力系统无功/电压的 灵敏度场景模型,利用灵敏度空间的场景聚类结果 指导系统电压控制。文献[15]针对风电经直流并网 系统,考虑风功率波动的影响,基于电压灵敏度法控 制系统电压偏移,但仅以电压偏移为控制目标可能 导致网损增大。以上文献均以控制变量为优化量, 分析其对潮流结果的影响。如何分析控制变量约束 对交直流潮流的影响,进而量化DFIG与VSC-HVDC 对交直流电网的潮流控制能力,现有文献未见涉及。 其难点在于如何选取对交直流电网潮流结果影响较 大的约束,通过改变约束范围以调节电网潮流。

本文针对DFIG风电场经AC/VSC-HVDC并网 系统,考虑风速波动和不同VSC控制方式,引入 DCPFC,以交直流网损和直流电压偏移指标最小为 目标,建立OPF模型,优化DFIG和VSC-HVDC控制 变量。根据OPF模型中的拉格朗日乘子,确定目标 函数对控制变量约束的灵敏度,量化DFIG与VSC-HVDC潮流控制能力。

1 DFIG 经 AC / VSC-HVDC 并网系统 OPF

1.1 DFIG与VSC-HVDC对OPF等式约束的影响 DFIG结构包括风力机、感应电机、背靠背变流 器(转子侧变流器(RSC)和网侧变流器(GSC))等,如图1所示。图中,P和Q分别为有功和无功功率;U和I分别为电压和电流;下标s、r、g、wt、DFIG分别表示定子、转子、GSC、风力机、DFIG的相关变量。



图 1 DFIG 结构 Fig.1 Structure of DFIG

相比大型火电和水电机组,风电机组(包括 DFIG)容量较小,额定电压较低,阻抗较大,因此不 可忽略其内部损耗,不便采用风速线性(非线性)函 数描述风电机组出力。下面引入DFIG详细稳态约 束,包括励磁支路功率约束(式(1))、GSC功率约束 (式(2))、转矩平衡约束(式(3))、定子侧对内/对外 无功约束(式(4))、定子侧对内有功约束(式(5))^[16]。

$$\begin{cases} \Delta P_{\rm m} = -P_{\rm m,s} - P_{\rm m,r} = 0\\ \Delta Q_{\rm m} = -Q_{\rm m,s} - Q_{\rm m} - Q_{\rm m,r} = 0 \end{cases}$$
(1)

$$\begin{cases} \Delta P_{g} = -P_{r,m} - P_{g,s} = 0\\ \Delta Q_{g} = Q_{g}^{*} - Q_{g,s} = 0 \end{cases}$$
(2)

$$\Delta T = -P_{\rm wt} / (1 - s) - P_{\rm em} = 0 \tag{3}$$

$$\Delta Q_{s} = \begin{cases} -Q_{\text{bFIG}}^{*} - Q_{s,m} - Q_{s,g} = 0 & \text{对} \text{fd} \\ Q_{\text{bFIG}}^{*} - Q_{\text{DFIG}} = 0 & \text{对} \text{fd} \end{cases}$$
(4)

$$\Delta P_{\rm s} = -P_{\rm s,m} - P_{\rm s,g} - P_{\rm DFIG} = 0 \tag{5}$$

其中, $P_{m,s}$ 为定子与转子间虚拟节点流向定子的有 功功率, $P_{g,s}$ 为GSC流向定子的有功功率,依此类推; Q_m 为励磁支路消耗的无功;s为转差率;T为转矩; Δ 表示变化量;下标m表示定子与转子间虚拟节点;下标 em表示电磁;上标"*"表示设定值。

计及 DFIG 详细结构后, DFIG 有功输出 P_{DFIG} 除 与风力机捕获功率(风速与风能利用系数的函数^[16]) 有关外,还受到定子、转子、GSC 与定子间变压器(或 电抗器)等的铜耗 P_{CR} 影响:

$$P_{\rm Cu} = \frac{P_{\rm s,m}^2 + Q_{\rm s,m}^2}{U_{\rm s}^2} R_{\rm s} + \frac{P_{\rm m,r}^2 + Q_{\rm m,r}^2}{U_{\rm m}^2} R_{\rm r} + \frac{P_{\rm g,s}^2 + Q_{\rm g,s}^2}{U_{\rm s}^2} R_{\rm T} (6)$$

其中,R为电阻;U为电压相量的幅值;下标T表示变压器。

由式(4)可知,改变 DFIG 无功设定值 Q_{DFIG}^* , DFIG 内部铜耗将产生变化,进而改变 DFIG 有功输 出和系统潮流分布。由式(6)可知, DFIG 内部铜耗 与定子电压相关,后者取决于电网潮流分布,因此 P_{DFIG} 不是已知量。将式(1)—(5)与电网潮流方程联 立求解,即可得到包括 DFIG 内部参数在内的潮流结 果。将U,/s设为变量,改进平电压启动策略,以避免 转差率正负变化引起的迭代过程振荡或不收敛。

考虑到风速波动或不同VSC控制方式会引起电 网潮流变化,可能影响系统运行,引入串联电压源型 DCPFC,与换流站共同控制系统潮流,VSC-HVDC和 DCPFC等效电路分别见附录A图A1和图A2。加入 DCPFC之后,VSC-HVDC内部约束除换流站与交流 电网连接点有功和无功平衡方程(式(7)和式(8))、 换流站交流侧有功平衡方程(式(9))之外,考虑到 DCPFC不同安装位置,引入选择系数 λ_{d1} 和 λ_{d2} 建立 DCPFC约束方程(式(10))^[6-7],设DCPFC安装在支 路L_{pq}始端,其中下标p,q分别为DCPFC首、末端节 点编号。

$$\Delta d_{1i} = P_{ii} + \frac{\sqrt{6}}{4\sqrt{R_{Li}^2 + X_{Li}^2}} M_i U_{ii} U_{di} \cos\left(\theta_{ii} - \theta_{ci} + a_i\right) - U_{ii}^2 \cos a_i / \sqrt{R_{Li}^2 + X_{Li}^2} = 0$$
(7)

$$\Delta d_{2i} = Q_{ii} + \frac{\sqrt{6}}{4\sqrt{R_{Li}^2 + X_{Li}^2}} M_i U_{ii} U_{di} \sin(\theta_{ii} - \theta_{ci} + a_i) - U_i^2 \sin a_i / \sqrt{R_i^2 + X_i^2} = 0$$
(8)

$$\Delta d_{3i} = U_{di}I_{di} + \frac{3}{8\sqrt{R_{Li}^2 + X_{Li}^2}} (M_i U_{di})^2 \cos a_i - \frac{\sqrt{6}}{4\sqrt{R_{Li}^2 + X_{Li}^2}} M_i U_{ii} U_{di} \cos(\theta_{ii} - \theta_{ci} - a_i) = 0 \quad (9)$$

$$\Delta d_{4i} = I_{di} - \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \lambda_{d1} \frac{(1 - K_d)U_{dp}}{R_{dpq}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{1}{2} \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{U_{di} - U_{dj}}{R_{dij}} - \frac{U_{di} - U_{di}}{R_{di}} - \frac{U_{di} - U_{di}}{$$

$$\lambda_{d2} \frac{(K_d^2 - 1)U_{dp} + (1 - K_d)U_{dq}}{R_{dpq}} = 0$$
 (10)

其中, $\Delta d_1 - \Delta d_4$ 为直流偏差量; θ 为相角;M为调制 度; R_L, X_L 分别为换流变压器和换流站内部损耗的等 效电阻和电抗; $a = \arctan(X_L/R_L)$; K_d 为 DCPFC 变比; 下标t、c分别表示换流站与交流电网连接点、换流站 交流侧节点;下标d表示直流;下标i, j为计数变量。 选择系数 $\lambda_{d1}, \lambda_{d2}$ 的取值方法如下: $\exists i = p$ 时, $\lambda_{d1} = 0$, $\lambda_{d2} = 1$; $\exists i = q$ 时, $\lambda_{d1} = 1, \lambda_{d2} = 0$;否则 $\lambda_{d1} = \lambda_{d2} = 0$ 。

联立式(1)—(10)与交流电网潮流方程,并结合 VSC的控制方式^[6],可求解DFIG经AC/VSC-HVDC 并网系统潮流。DFIG与VSC内部约束均需结合电 网潮流方程求解,增加了OPF等式约束非线性程度。 1.2 DFIG经AC/VSC-HVDC并网系统OPF模型

对于 DFIG 经 AC / VSC-HVDC 并网系统, DFIG 无功设定值 Q^*_{DFIG} 决定了无功输出;若换流站采用下 垂控制,下垂系数 K_{droop} 、换流站注入的交流有功和无 功参考值 $P_{t,ref}$ 和 $Q_{t,ref}$ 决定了换流站电压与功率间的 关系; DCPFC 变比 K_d 与同步机组出力 P_G 、 Q_G 亦会改 变交直流电网潮流分布。为此,以上述变量为控制 变量,以交流电网和 DFIG 内部节点电压相角、 U_d 、 I_d 、 $\theta_t - \theta_c$ 、*M*为状态变量,将状态变量和控制变量记为*x*, 建立 OPF 模型求解 DFIG 与 VSC-HVDC 最优控制变 量。为反映交直流网损和直流电压偏移,选取目标 函数 *f* 如下:

$$\begin{cases} f = \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} f_{i} = \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left(\lambda_{fi} \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{\infty} + \frac{1}{n_{i}} \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{1} \right) \\ \beta_{1j} = \frac{P_{\text{al.},j}}{P_{\text{aloss, max}}}, \quad \beta_{2j} = \frac{P_{\text{dL},j}}{P_{\text{dloss, max}}}, \quad \beta_{3j} = \frac{U_{\text{dj}} - U_{\text{dN},j}}{U_{\text{dN},j} \Delta U_{\text{d, max}}} \end{cases}$$
(11)

其中, f_1 、 f_2 分别为交、直流系统网损指标; f_3 为直流 电压偏移指标; P_{aL} 、 P_{dL} 分别为交、直流线路有功; $P_{aloss,max}$ 、 $P_{dloss,max}$ 分别为交、直流网损最大值; U_{dN} 为直 流额定电压; $\Delta U_{d,max}$ 为最大允许的直流电压偏差; n_i 为向量 β_i 的维数; β_1 、 β_2 分别为交、直流线路有功与网 损最大值的比值; β_3 为直流电压偏差实际值与最大 值的比值; α_i 为重要性修正因子; \otimes 表示向量对应元 素相乘; $\|\cdot\|_{a}$ 和 $\|\cdot\|_{1}$ 分别表示向量的 ∞ -范数和 1-范数; λ_i 为选择系数, 当 $\alpha_i \otimes \beta_i$ 中各元素均小于其门 槛值^[17]时, 其取值为0, 否则取值为1; ε_i 为权系数。

当交直流线路有功均小于其门槛值时, f₁和 f₂ 反映交直流网损;当某条线路有功大于其门槛值时, f₁和 f₂不仅反映交直流网损,还反映线路最大载荷。 同理,当直流电网各节点电压偏移均小于其门槛值 时, f₃反映直流电网平均电压偏移;当某节点电压偏 移大于其门槛值时, f₃不仅反映直流电网平均电压 偏移,还反映节点电压的最大偏移。

对于不等式约束,除状态变量和控制变量应 满足上下限约束外,还应考虑交流线路功率和直 流线路电流约束。DFIG有功出力受风力机捕获功 率的限制,无功出力受定子电流、转子电流影响, 同时需考虑转差率、GSC无功支持的影响,如式(12) 所示^[18]。

$$\begin{aligned}
& 0 \leq P_{\text{DFIG}} \leq P_{\text{wt, max}} - P_{\text{Cu}} \\
& Q_{\text{DFIG, min}} = -\sqrt{U_s^2 I_{s, \text{max}}^2 - \frac{P_{\text{DFIG}}^2}{(1-s)^2}} - \sqrt{S_{gN}^2 - \frac{s^2 P_{\text{DFIG}}^2}{(1-s)^2}} \\
& Q_{\text{DFIG, max}} = \sqrt{r_r^2 - \frac{P_{\text{DFIG}}^2}{(1-s)^2}} - \frac{U_s^2}{X_s + X_m} + \sqrt{S_{gN}^2 - \frac{s^2 P_{\text{DFIG}}^2}{(1-s)^2}} \\
& r_r^2 = \frac{X_m^2 U_s^2 I_{r, \text{max}}^2}{(X_s + X_m)^2}
\end{aligned}$$
(12)

其中,*S*_{gN}为GSC的额定容量;*r*²为由转子电流限制的 无功出力上限;下标 max、min分别表示对应变量的 最大值、最小值。

对于DFIG经AC/VSC-HVDC并网系统OPF模型,可采用内点法^[19]进行求解,建立拉格朗日函数:

$$\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{v} - \boldsymbol{g}_{\mathrm{max}}) - b \sum_{j=1}^{n_{\mathrm{in}}} \ln l_j - b \sum_{j=1}^{n_{\mathrm{in}}} \ln v_j \quad (13)$$

其中,**h**为等式约束;**g**、**g**_{max}和**g**_{min}分别为不等式约束 及其上、下限;**n**_{in}为不等式约束的个数;**l**=[l_1 , l_2 ,…, $l_{n_{in}}$]、**v**=[v_1 , v_2 ,…, $v_{n_{in}}$]为松弛变量;**y**=[y_1 , y_2 ,…, y_{n_e}]、 **z**=[z_1 , z_2 ,…, $z_{n_{in}}$]、**w**=[w_1 , w_2 ,…, $w_{n_{in}}$]为拉格朗日乘 子, n_e 为等式约束的个数;**b**为扰动因子,且**b**>0。

2 目标函数 / 约束灵敏度分析

改变DFIG与VSC-HVDC约束上下限,OPF目标 函数将随之变化。针对VSC-HVDC约束,推导拉格 朗日乘子(具体推导过程见附录B)可得:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}_{d, \max}} = \boldsymbol{w}_{d}^{\mathrm{T}}, \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}_{d, \min}} = \boldsymbol{z}_{d}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{x}_{d} = [K_{droop} \ P_{t, \mathrm{ref}} \ Q_{t, \mathrm{ref}} \ K_{d}] \end{cases}$$
(14)

其中, $\partial f/\partial \mathbf{x}_{d,max}$ 和 $\partial f/\partial \mathbf{x}_{d,min}$ 分别为目标函数对VSC-HVDC约束上、下限的灵敏度,其物理意义为放宽VSC-HVDC约束对目标函数的边际影响^[20]。

GSC 额定容量会影响 DFIG 无功范围,进而改变目标函数,定义 k_{sev}为 DFIG 无功范围对 GSC 额定容量的灵敏度,可得:

$$\frac{\partial f}{\partial S_{gN}} = k_{SgN} \left(\frac{\partial f}{\partial Q_{DFIG, max}} - \frac{\partial f}{\partial Q_{DFIG, min}} \right) = \frac{S_{gN}}{\sqrt{S_{gN}^2 - \frac{s^2 P_{DFIG}^2}{(1-s)^2}}} \left(w_{DFIG} - z_{DFIG} \right)$$
(15)

为分别分析约束上下限对交、直流网损指标 以及直流电压偏移指标的影响,令(ε_1 , ε_2 , ε_3)分别为 (1,0,0)、(0,1,0)、(0,0,1),向量 $A=[U_{d,max}, U_{d,min}, k_{seN}S_{gN}]^T$,可得 $f_1 - f_3$ 对VSC-HVDC约束上下限与 GSC额定容量的灵敏度,如式(16)所示。

$$\partial \left(\boldsymbol{I}_{3} \begin{bmatrix} f_{1} & f_{2} & f_{1} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \right) / \partial \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_{\mathrm{d},1}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{w}_{\mathrm{d},2}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{w}_{\mathrm{d},3}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{z}_{\mathrm{d},1}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{z}_{\mathrm{d},2}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{z}_{\mathrm{d},3}^{\mathrm{T}} \\ w_{\mathrm{DFIG},1} - \boldsymbol{z}_{\mathrm{DFIG},1} & w_{\mathrm{DFIG},2} - \boldsymbol{z}_{\mathrm{DFIG},2} & w_{\mathrm{DFIG},3} - \boldsymbol{z}_{\mathrm{DFIG},3} \end{bmatrix} (16)$$

其中, I_3 为三阶单位矩阵; $w_{d,i}$, $z_{d,i}$ 分别为 f_i 对VSC-HVDC约束上、下限的灵敏度; $w_{DFIG,i}$, $z_{DFIG,i}$ 分别为 f_i 对DFIG无功上、下限的灵敏度。

式(14)和式(15)反映了改变VSC-HVDC约束上 下限与GSC额定容量时目标函数的边际改善量。当 其他变量约束条件不变时,可将目标函数视为VSC-HVDC约束上下限与GSC额定容量的函数,若忽略 高阶项,其边际改善量为:

$$\left|\Delta f\right| = \left|\Delta \boldsymbol{x}_{d, \max} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}_{d, \max}} + \Delta \boldsymbol{x}_{d, \min} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}_{d, \min}} + \Delta S_{gN} \frac{\partial f}{\partial S_{gN}}\right| (17)$$

由式(11)中选择系数 λ_a 的取值方法,可得改变 VSC-HVDC约束上下限与GSC额定容量后边际改善 量的变化范围,如式(18)所示(具体推导过程见附录 C)。边际改善量下限证明了改变约束边界后的控 制效果,上限可以防止系统潮流变化过大。

$$\sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left(\min \left\{ \frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{\alpha}_{i}^{\mathrm{T}} \middle| \Delta \boldsymbol{\beta}_{i} \middle|, \left| \frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{\alpha}_{i}^{\mathrm{T}} \middle| \Delta \boldsymbol{\beta}_{i} \middle| - \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{x} \right| \right\}, \\ \left| \frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{\alpha}_{i}^{\mathrm{T}} \middle| \Delta \boldsymbol{\beta}_{i} \middle| - \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{x} \right\} \right) \leq |\Delta f| \leq \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left(\max \left\{ \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{x}, \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{x} \right\} + \frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{\alpha}_{i}^{\mathrm{T}} \middle| \Delta \boldsymbol{\beta}_{i} \right| \right)$$
(18)

其中,下标0表示VSC-HVDC约束上下限与GSC额 定容量变化前系统变量的取值;max{·}和min{·}分 别表示取最大值和最小值。

为进一步量化 DFIG 与 VSC-HVDC 潮流控制能力,提出灵敏度指标ζ,如式(19)所示。ζ越大,表明 DFIG 与 VSC-HVDC 潮流控制能力越强。

$$\zeta = \max\left\{ \left| \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}_{d, \max}} \right|, \left| \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}_{d, \min}} \right|, \left| \frac{\partial f}{\partial S_{gN}} \right| \right\}$$
(19)

3 算例分析

3.1 DFIG 风电场经 AC / VSC-HVDC 并网 OPF 结果

为验证所提风电经交直流并网系统 OPF 模型的 有效性,以图 2 中修改后的 IEEE 14 节点测试系统为 例进行分析。取基准容量为 100 MV·A,直流基准电 压为 100 kV。100 台 2 MW DFIG 接入节点 15,升压 后连接到五端 VSC-HVDC 系统和交流电网。DFIG



图2 DFIG风电场经AC/VSC-HVDC并网测试系统

Fig.2 Test system with DFIG wind farms integrated through AC / VSC-HVDC

原始参数来源于文献[16](详见附录D表D1),GSC额 定容量为DFIG容量的3/10。对于五端VSC-HVDC 系统,VSC₁、VSC₃、VSC₅采用下垂与定交流无功控 制,VSC₂采用定交流有功与定交流电压控制,VSC₄ 采用定交流有功与定交流无功控制,换流站和直流 线路具体参数分别如附录D表D2和表D3所示, DCPFC连接在直流线路L₁₄始端。节点电压允许波 动量均为±10%。风速波动曲线和参数上下限分别 如附录D图D1和表D4所示。

取风速为8 m/s,功率和电压门槛值为极限值的90%,重要性修正因子均为1,权系数 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.3$, $\varepsilon_3 = 0.4^{[6]}$ 。基于以上数据,采用本文OPF模型优化控制变量,并与优化前进行对比,结果如表1—3和图3所示,其中 $P_{\rm G}$ 、 $Q_{\rm G}$ 、 $P_{\rm t,ref}$ 、 $Q_{\rm DFIG}$ 、目标函数值均为标幺值,后同。

表1 同	司步机控制变量优化结果
------	-------------

Table 1 Optimization results of control variables

for	generators
101	Selleraton

		0		
同步机 —	i	P _G	Q	G
	优化前	优化后	优化前	优化后
G ₁	1.00	0.5761	-0.1490	0.3499
G_2	0.40	0.3777	0.4904	0.3999
G_3	0.70	0.6801	0.2744	0.3251
G_4	0.45	0.3026	0.2960	0.2250
G ₅	0.45	0.3322	0.3092	0.1191

表2 换流站控制变量优化结果

Table 2 Optimization results of control variables for

converter stations								
協运計.	$P_{\rm t,ref}$		Q_{i}	, ref	$K_{ m droop}$			
快抓垍	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后		
VSC_1	_	_	0.10	-0.1177	6	33.2201		
VSC_2	0.8	0.0372	_	_	_	_		
VSC_3	_	_	-0.02	0.0055	10	38.8912		
VSC_4	-0.8	-0.6372	0.12	-0.1097	_	—		
VSC_5	—	—	-0.15	-0.1643	6	35.5735		

表3 DFIG与DCPFC控制变量优化结果

Table 3 Optimization results of control variables for

DFIG and DCPFC





由结果可见,对于控制变量而言,换流站下垂系数变大,换流站倾向于控制直流电压;DCPFC变比增大,换流站注入的直流电流与流入换流站的交流有功变化幅度增加;DFIG无功设定值变号,这是由于系统无功较为充足,DFIG转为消耗无功。对于目标函数而言,优化后交流网损指标f,下降了15%, 直流网损指标f2下降了88%,直流电压偏移指标f3 下降了85%,即电网功率和电压分布相比优化前均明显得到改善,反映了对DFIG风电场经AC/VSC-HVDC并网系统进行潮流优化的必要性,也证明了本文所提优化策略的有效性和应用价值。

若忽略DFIG损耗,将风力机出力简化为风速线 性函数(具体表达式见附录 E^[11]),得到采用简化 DFIG模型时的OPF结果如图3所示。可见采用简 化DFIG模型所得优化结果与本文模型所得精确值 相差7.4%,而其交流网损指标优化结果与本文模型 所得精确值相差15.7%。进一步计算分析表明,上 述误差随 DFIG 台数增加而增加,证明了本文计及 DFIG 详细结构的必要性。

3.2 风速变化和VSC控制方式对优化结果的影响

风速具有较大的随机性和波动性,风速变化直 接影响风电机组出力,从而对优化结果产生影响,如 图 4(a)所示。当选择不同的 VSC 控制方式时,潮流 分布将发生很大变化。以 VSC₁为例,分别选择以下 方式,分析其对优化结果的影响,结果如图 4(b)所 示。图中,方式1采用下垂控制与定交流无功, $U_{d,ref}=1$ p.u., $P_{d,ref}=0.8$ p.u., $K_{droop}=6$, $Q_{t,ref}=0.1$ p.u.;方 式2采用定交流有功与定交流无功, $P_{t,ref}=0.8$ p.u., $Q_{t,ref}=0.1$ p.u.;方式3采用定直流电压与定交流无 功, $U_{d,ref}=1$ p.u., $Q_{t,ref}=0.1$ p.u.;方式5采用 定交流电压, $U_{d,ref}=1$ p.u., $U_{t,ref}=1$ p.u., $U_{t,ref}=1$ p.u.,





可以看出,优化后的目标函数值在任意风速下 均远小于优化前的值。优化前,当选择不同的VSC, 控制方式时,目标函数值变化幅度很大。而采用本 文优化策略时,目标函数值在各种控制方式下近似 保持不变,且均小于优化前的值。综上所述,本文所 提优化策略在风速变化或换流站控制方式改变时, 仍能有效优化目标,具有良好适应性。

3.3 目标函数对约束的灵敏度分析

采用内点法计算时拉格朗日乘子w和z即为目标 函数对不等式约束上下限的灵敏度。对于VSC-HVDC 而言,目标函数对 DCPFC 变比约束上、下限的灵敏 度分别为 $\partial f/\partial K_{d,max}$ =-0.0046、 $\partial f/\partial K_{d,min}$ =0.0526。可见 $\partial f/\partial K_{d,min}$ 与 $\partial f/\partial K_{d,max}$ 异号,这是由于增加变比下限会 缩小最优解范围,进而导致目标函数增加,而增加变 比上限效果恰好与之相反。目标函数对单个换流站 控制变量约束灵敏度的最大值为 $\partial f/\partial P_{i4ref,min}$ =0.0022 ($P_{i4ref,min}$ 为VSC₄交流有功参考值的下限),即相较于 改变换流站约束上下限,改变 DCPFC 变比约束下 限对目标函数的影响更大。对于 DFIG 而言,DFIG 无功范围对 GSC 额定容量的灵敏度 k_{sgN} =1.0014,进 而可得目标函数对 GSC 额定容量的灵敏度 $\partial f/\partial S_{gN}$ = -0.0015。

根据式(19),灵敏度指标 ζ =0.0526,其含义为若 DFIG或VSC-HVDC的某个控制变量约束上下限变 化1%,目标函数最多可减小1.09%(0.0526×0.01÷ 0.0484×100%),进而量化了DFIG与VSC-HVDC对 交直流电网的潮流控制能力。

令(ε_1 , ε_2 , ε_3)分别为(1,0,0)、(0,1,0)、(0,0, 1),可得交直流网损指标和直流电压偏移指标 f_1 — f_3 对约束上下限的灵敏度,如表4所示。表中, $\partial f_i/\partial C_{max}$ 和 $\partial f_i/C_{min}$ 分别为 f_i 对换流站各约束上、下限灵敏度中 绝对值最大的元素。可以看出,DFIG对目标函数的 边际改善能力弱于VSC-HVDC;DFIG与换流站约束 对直流网损指标几乎无影响,这是由于直流网损本 身较小,且DFIG与换流站约束均非直接控制直流线 路有功。

表4 交直流网损和直流电压偏移指标灵敏度

Table 4 Sensitivities of loss index for AC/DC hybrid grid and DC voltage deviation index

		-	
指标灵敏度	数值	指标灵敏度	数值
$\partial f_1 / \partial K_{\rm d,max}$	0	$\partial f_2 / \partial C_{\min}$	0
$\partial f_1 / \partial K_{\mathrm{d,min}}$	0.0539	$\partial f_2 / \partial S_{\rm gN}$	0
$\partial f_1 / \partial C_{\max}$	-0.0051	$\partial f_3 / \partial K_{ m d,max}$	0
$\partial f_1 / \partial C_{\min}$	0.0009	$\partial f_3 / \partial K_{ m d,min}$	0.0012
$\partial f_1 / \partial S_{\mathrm{gN}}$	-0.0002	$\partial f_3 / \partial C_{\max}$	-0.0004
$\partial f_2 / \partial K_{\mathrm{d,max}}$	-0.0033	$\partial f_3 / \partial C_{\min}$	0.0163
$\partial f_2 / \partial K_{\rm d,min}$	0	$\partial f_3 / \partial S_{ m gN}$	0
$\partial f_2 / \partial C_{\max}$	0		

4 结论

针对DFIG风电场经AC/VSC-HVDC并网系统, 考虑风速波动和不同VSC控制方式的影响,引入 DCPFC,以交直流网损和直流电压偏移指标最小为 目标,建立计及DFIG详细结构的OPF模型,优化 DFIG和VSC-HVDC控制变量。根据OPF拉格朗日 乘子,分析DFIG与VSC-HVDC约束上下限对目标函 数边际的影响,量化其潮流控制能力,得到以下 结论:

(1)所提 OPF 模型可有效改善潮流分布,适用于 不同风速和 VSC 控制方式,具有良好应用价值,若 DFIG 采用简化模型,将与本文所得结果相差较大, 且误差随 DFIG 台数的增加而增加;

(2)灵敏度指标ζ越大,改变DFIG与VSC-HVDC 约束上下限对目标函数的影响越大,DFIG与VSC-HVDC对交直流电网的潮流控制能力越强;

(3)对于相同的目标函数边际改善量,可选择所 需调节量较小的约束(目标函数对其上下限的灵敏 度较大)进行调节。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]杨金刚,袁志昌,李顺昕,等. 经柔性直流输电并网的大型风电场频率控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):109-114.
 YANG Jingang, YUAN Zhichang, LI Shunxin, et al. Frequency control strategy for large-scale wind farm grid-connection through VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(6):109-114.
- [2]周密,徐箭,孙元章. 多端柔性直流电网平抑风电波动的协调 控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):29-35.
 ZHOU Mi, XU Jian, SUN Yuanzhang. Coordinated control restraining wind power fluctuation of VSC-MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(12):29-35.
- [3] ROUZBEHI K, MIRANIAN A, LUNA A, et al. DC voltage control and power sharing in multiterminal DC grids based on optimal DC power flow and voltage-droop strategy[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4):1171-1180.
- [4]杨越,张文亮,汤广福,等.直流电网潮流控制器的配置方法
 [J].电网技术,2015,39(8):2210-2216.
 YANG Yue,ZHANG Wenliang,TANG Guangfu, et al. Collocating method of power flow controllers for DC grids[J]. Power System Technology,2015,39(8):2210-2216.
- [5] DIAZ N L, DRAGIČEVIĆ T, VASQUEZ J C, et al. Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids-a new concept on cooperative control without communications beyond droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(5):2476-2485.
- [6] 苗丹,刘天琪,王顺亮,等. 含柔性直流电网的交直流混联系统 潮流优化控制[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):70-76.
 MIAO Dan,LIU Tianqi,WANG Shunliang, et al. Optimal control for power flow of AC/DC hybrid system with flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41 (12):70-76.
- [7] 李国庆,龙超,孙银锋,等.直流潮流控制器对直流电网的影响 及其选址[J].电网技术,2015,39(7):1786-1792.

LI Guoqing, LONG Chao, SUN Yinfeng, et al. Impact and location analysis of DC power flow controller on DC grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1786-1792.

- [8] 王第成,胡林献,邱迪.电压型直流潮流控制器优化配置方法
 [J].电力系统自动化,2016,40(21):78-83.
 WANG Dicheng,HU Linxian,QIU Di. Optimal locating method of voltage-type DC power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(21):78-83.
- [9] 李国庆,关佳欣,王鹤,等.含DCPFC的交直流混合系统多目标最优潮流研究[J]. 电网技术,2020,44(1):238-244.
 LI Guoqing,GUAN Jiaxin,WANG He, et al. Multi-objective optimal power flow study of AC / DC hybrid system considering DCPFC[J]. Power System Technology,2020,44(1):238-244.
- [10] 杨智豪,牟龙华,刘仲.含VSC-HVDC并网风电场的电力系统 最优潮流计算[J].电力系统保护与控制,2016,44(12):36-41.
 YANG Zhihao, MU Longhua, LIU Zhong. Optimal power flow of wind farm grid-connected system based on VSC-HVDC[J].
 Power System Protection and Control,2016,44(12):36-41.
- [11] RABIEE A, SOROUDI A. Stochastic multiperiod OPF model of power systems with HVDC-connected intermittent wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29 (1):336-344.
- [12] 李逸驰,孙国强,杨义,等. 含经VSC-HVDC并网海上风电场的 交直流系统概率最优潮流[J]. 电力自动化设备,2015,35(9): 136-142.
 LI Yichi,SUN Guoqiang,YANG Yi, et al. Probabilistic optimal power flow of AC / DC system with offshore wind farm connected to grid via VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(9):136-142.
- [13] 夏成军,王真,周保荣,等.基于电压灵敏度的受端系统电压支 撑强度评价指标(二):VSC-HVDC对LCC-HVDC受端系统电 压支撑强度的影响[J/OL].电网技术.(2018-10-24)[2019-11-05].https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1750.
- [14] 明杰,向红吉,戴朝华,等. 多风电场接入的灵敏度场景静态无 功/电压评估[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):102-108. MING Jie,XIANG Hongji,DAI Chaohua, et al. Static reactive power/voltage assessment of sensitivity scenarios with multiple wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37 (12):102-108.
- [15] LIU Y, CHEN Z. Voltage sensitivity based reactive power control on VSC-HVDC in a wind farm connected hybrid multi-infeed HVDC system[C] //2013 IEEE Grenoble Conference. Grenoble, France: IEEE, 2013; 1-6.
- [16] LI S. Power flow modeling to Doubly-Fed Induction Generators (DFIGs) under power regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3292-3301.
- [17] 徐鹏,杨胜春,李峰,等. 基于层次分析和变权重机制的电网安 全指标计算[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):133-140. XU Peng,YANG Shengchun,LI Feng,et al. Power grid security index calculation and display method based on AHP and variable weight mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(8):133-140.
- [18] LI S. Operation region of doubly fed induction generators based on rotor slip under maximum power point tracking control and power dispatch[J]. Electric Power Components & Systems, 2014, 42(8):808-817.
- [19] 张哲,杨航,尹项根,等. 电网运行风险在线评估中基于灵敏 度分析的负荷削减模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(5): 90-95.
 ZHANG Zhe,YANG Hang,YIN Xianggen, et al. Load shedding model based on sensitivity analysis in on-line power sys-

ding model based on sensitivity analysis in on-line power system operation risk assessment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5):90-95.

[20] 赵渊,杨晓嵩,谢开贵. UPFC 对电网可靠性的灵敏度分析及优化配置[J]. 电力系统自动化,2012,36(1):55-60.

ZHAO Yuan, YANG Xiaosong, XIE Kaigui. Parameter sensitivity and optimal allocation of UPFCs in bulk power systems reliability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1):55-60.

作者简介:

李生虎(1974—),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统 分析与控制、柔性输电技术在电力系统中的应用(E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn);



齐 涛(1995—),男,安徽铜陵人,硕士 研究生,主要研究方向为柔性直流输电、风 电系统分析与控制(E-mail:qitao@mail.hfut. edu.cn);

张 楠(1996—),女,安徽淮南人,硕 士研究生,主要研究方向为含特高压直流输 电系统的可靠性分析(E-mail:2018110352@ mail.hfut.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Optimal power flow and sensitivity analysis for power system with DFIG-wind farms integrated through AC / VSC-HVDC power transmission

LI Shenghu, QI Tao, ZHANG Nan, ZHAO Huijie, HU Tao

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Considering wind speed fluctuation and switch of VSC (Voltage-Source Converter) control mode, the DCPFC (Direct-Current Power Flow Controller) is introduced to the power system with DFIG-wind farms integrated through AC / VSC-HVDC (AC / VSC-High Voltage Direct Current). An optimal power flow model that minimizes the power loss of AC / VSC-HVDC grid and the DC voltage deviation index is developed, which includes detailed configuration of DFIG, so as to optimize the control variables of DFIG and VSC-HVDC. The sensitivities of the objective function with respect to the constraints of DFIG and VSC-HVDC are derived based on Lagrange multipliers at the optimal solution. As a result, the power flow control capability of both DFIG and VSC-HVDC is evaluated. The effectiveness and potential applications of the proposed model and the sensitiveness analysis are validated by numerical results of IEEE 14-bus system. **Key words**: doubly-fed induction generator; wind farms; VSC-HVDC power transmission; DCPFC; optimal power flow; sensitivity analysis

(上接第45页 continued from page 45)

Fast solution method for optimal dispatching of multi-area integrated electricity-gas systems based on improved second-order cone relaxation

ZHANG Yong¹, LI Chen², JIA Nan³, LIU Nian³, WANG Cheng³

(1. State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050011, China;

2. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100032, China;

3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: As for the difficulties of area sub-problem's non-convexity in the solution of optimal dispatch strategy for MIEGSs (Multi-area Integrated Electricity-Gas Systems), an improved SOC (Second-Order Cone) relaxation method that can achieve fast calculation is proposed. The mathematical model of MIEGSs is developed and the pipeline equation constraint is transformed into linear constraint by relaxation, the initial value of pipeline gas flow can be obtained by solving relaxation model, and the gas flow direction can be determined by the initial value. Based on this gas flow direction, SOC relaxation can be adopted without introducing integer variables, and the optimal solution of area sub-problem can be acquired. Then, ADMM(Alternating Direction Multipliers Method) is used to solve area sub-problems iteratively to achieve cooperation among areas. In total, the proposed method needs no integer variables introduced, guarantees the convergence of ADMM as only convex optimization problems are solved. In addition, the solution speed of proposed method is relatively high. Lastly, the effectiveness and rapidity of the proposed method are verified through simulation example, and the impact of system parameters on the performance of the proposed method is analyzed.

Key words: multi-area integrated electricity-gas systems; convex optimization; decentralized optimization; improved second-order cone relaxation method; optimal dispatching strategy

附 录

附录 A

图 A1、A2 分别给出 VSC-HVDC、串联电压源型 DCPFC 等效电路,其中串联电压源型 DCPFC 是通过在直流线路中 串联一个可调节的电压源,起到控制节点电压与支路电流的作用,若仅考虑外部特性,可用一个变比为 K_d的理想直流变压 器模型代替^[7]。图 A1 中, U、θ 分别为电压和相角; P、Q 分别为有功和无功; 下标 t、c 分别表示换流站与交流电网连接 点、换流站交流侧节点; 下标 d 表示直流; R_L、X_L 分别为换流变压器和换流站内部损耗的等效电阻和电抗; *i* 为计数变量。 图 A2 中,下标 I 和 E 分别表示输入和输出;变比 K_d=U_E/U₁。



图 A1 VSC-HVDC 等效电路 Fig.A1 Equivalent circuit of VSC-HVDC



图 A2 串联电压源型 DCPFC 等效电路 Fig.A2 Equivalent circuit of series voltage source DCPFC

附录 B 拉格朗日乘子推导

求解式(13)的库恩-塔克条件^[19],在最优解 x_{opt} 处有:

$$\nabla_x f(\mathbf{x}_{opt}) - \sum_{j=1}^{mm} \nabla h_j(\mathbf{x}_{opt}) y_j - \sum_{j=1}^{rr} \nabla g_j(\mathbf{x}_{opt}) (z_j + w_j) = 0$$
(B1)

将式(B1)各项同乘以 dx, 可得:

$$df - \sum_{j=1}^{mm} y_j dh_j - \sum_{j=1}^{rr} (z_j + w_j) dg_j = 0$$
(B2)

拉格朗日乘子 z_j 和 w_j 具有重要的物理意义,量化了不等式约束 $g_j(\mathbf{x})$ 的约束上、下界放宽 dg_j 后,引起目标函数值变 化量^[20]:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial g_{j,\max}} = w_j \\ \frac{\partial f}{\partial g_{j,\min}} = z_j \end{cases}$$
(B3)

将上式中 g_j 换成本文 VSC-HVDC 约束,即得式(14)。

由边际改善量的定义,得:

$$\begin{split} |\Delta f| &= \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left| \lambda_{\mathrm{f}i} \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{\infty} - \lambda_{\mathrm{f}i,0} \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{\infty} + \frac{1}{n_{i}} \left(\left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{1} - \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{1} \right) \right| \\ &= \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left| \lambda_{\mathrm{f}i} \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{\infty} - \lambda_{\mathrm{f}i,0} \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{\infty} + \frac{1}{n_{i}} \left(\left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \Delta \left| \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{1} \right) \right| \\ &= \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left| \lambda_{\mathrm{f}i} \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{\infty} - \lambda_{\mathrm{f}i,0} \left\| \boldsymbol{\alpha}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{\infty} + \frac{1}{n_{i}} \left(\boldsymbol{\alpha}_{i}^{\mathrm{T}} \cdot \left| \Delta \left| \boldsymbol{\beta}_{i} \right| \right) \right| \end{split}$$
(C1)

由于式(11)中选择系数 λ_{fi}为 0 或 1,因此可得边际改善量的上下限如式(C2)、(C3)所示。

$$\begin{split} |\Delta f| &\leq \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left| \lambda_{fi} \left\| \boldsymbol{a}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{\infty} - \lambda_{fi,0} \left\| \boldsymbol{a}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{\infty} + \frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{a}_{i}^{\mathrm{T}} \cdot |\Delta |\boldsymbol{\beta}_{i}| \right\| \\ &\leq \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left[\left| \lambda_{fi} \left\| \boldsymbol{a}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{\infty} - \lambda_{fi,0} \left\| \boldsymbol{a}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{\infty} \right| + \frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{a}_{i}^{\mathrm{T}} \cdot |\Delta |\boldsymbol{\beta}_{i}| \right| \right] \\ &\leq \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left[\max \left\{ \left\| \boldsymbol{a}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{\infty} , \left\| \boldsymbol{a}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{\infty} \right\} + \frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{a}_{i}^{\mathrm{T}} \cdot |\Delta |\boldsymbol{\beta}_{i}| \right| \right] \\ &\leq \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left[\max \left\{ \left\| \boldsymbol{a}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i} \right\|_{\infty} , \left\| \boldsymbol{a}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{\infty} \right\} + \frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{a}_{i}^{\mathrm{T}} \cdot |\Delta |\boldsymbol{\beta}_{i}| \right| \right] \\ &\geq \sum_{i=1}^{3} \varepsilon_{i} \left[\frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{a}_{i}^{\mathrm{T}} \cdot |\Delta |\boldsymbol{\beta}_{i}| \right| , \left| \frac{1}{n_{i}} \boldsymbol{a}_{i}^{\mathrm{T}} \cdot |\Delta |\boldsymbol{\beta}_{i}| - \left\| \boldsymbol{a}_{i} \otimes \boldsymbol{\beta}_{i,0} \right\|_{\infty} \right| \right] \end{aligned} \tag{C3}$$

附录 D

表 D1—D4 分别给出 DFIG、直流线路、换流站原始参数和系统变量上下限。表 D1 中, $c_1 - c_9$ 为风能利用系数 C_p 系数项; ρ 为空气密度; pp 为极对数; r_w 为叶片半径; η 为变速箱增速比。表 D2 中, $I_{ij,max}$ 为直流线路电流最大值。表 D4 中, $P_{\text{loss,max}} 和 P_{\text{dloss,max}} 分别为交、直流网损最大值。$

	衣 D1 DFIG 原始 多数 Table D1 Parameters of DFIG							
变量	数值	变量	数值					
<i>R</i> _s /p.u.	0.0078	c_4	0.002					
$X_{\rm s}/{\rm p.u.}$	0.0794	С5	2.14					
$R_{\rm r}$ /p.u.	0.025	<i>c</i> ₆	13.2					
$X_{\rm r}$ /p.u.	0.4	<i>C</i> ₇	18.4					
$X_{\rm m}/{\rm p.u.}$	4.1039	<i>C</i> ₈	-0.02					
$R_{\rm T}/{\rm p.u.}$	0.03	С9	-0.003					
$X_{\rm T}/{\rm p.u.}$	0.05	ho / kg/m ³	1.225					
c_1	0.73	рр	2					
<i>c</i> ₂	151	$r_{\rm w}/{ m m}$	35.5					
<i>C</i> ₃	0.58	η	94					

DFIG 百佔会粉

表 D2 直流线路原始参数

Table D2	Parameters o	f DC lines
直流线路	$R_{\rm d}/{\rm p.u.}$	I _{ij,max} /p.u.
L ₁₂	0.039	2.5641
L ₂₃	0.063	1.5873
L ₂₄	0.025	4
L_{41}	0.078	1.2821
L ₄₅	0.05	2
L ₅₁	0.05	2

表 D3 换流站原始参数 Table D3 Parameter meters of converter station

换流站	控制方式	$P_{\rm t,ref}/{\rm p.u.}$	$Q_{\rm t,ref}$ /p.u.	$U_{\rm t,ref}$ /p.u.	$U_{\rm d,ref}/{\rm p.u.}$	$P_{\rm d,ref}/{\rm p.u.}$	$K_{\rm droop}/{\rm p.u.}$	$R_{\rm L}/{\rm p.u.}$	$X_{\rm L}/{\rm p.u.}$
VSC_1	下垂,定 Q_t	-	0.1	-	1	0.8	6	0.003	0.142
VSC_2	定 P_t ,定 U_t	0.8	-	1	-	-	-	0.003	0.167
VSC ₃	下垂, 定 Q _t	-	-0.02	-	1	-0.7	10	0.005	0.167
VSC_4	定 P_t ,定 Q_t	-0.8	0.12	-	-	-	-	0.005	0.163
VSC ₅	下垂, 定 Q _t	-	-0.15	-	1	0.4	6	0.006	0.125

12 Nm/ 8 8 24 20 10 时间 /h 15 5

图 D1 风速变化曲线 Fig.D1 Curve of wind speed

	表 D4 参数上下限
Table D4	Upper bound and lower bound of parameters

亦具	$P_{\rm t,ref}$	Q _{t,ref}	Kdroop	K _d	I _s	Ir	$P_{\rm loss,max}$	P _{dloss,max}
	/p.u.	/p.u.	/p.u.	/p.u.	/p.u.	/p.u.	/p.u.	/p.u.
上限	1.5	1.5	44	1.05	1.1	1.1	4	0.2
下限	-1.5	-1.5	0	1	-	-	-	-

附录 E 风力机出力线性函数简化模型

现有风电经交直流并网系统 OPF 模型,常采用风速的非线性或线性函数(式(E1))来简化表达风力机出力。

$$P_{\rm wt}(v_{\rm w}) = \begin{cases} 0, & 0 \le v_{\rm w} \le v_{\rm ci} \\ P_{\rm wtN} \frac{v_{\rm w} - v_{\rm ci}}{v_{\rm N} - v_{\rm ci}}, & v_{\rm ci} < v_{\rm w} \le v_{\rm N} \\ P_{\rm wtN}, & v_{\rm N} < v_{\rm w} \le v_{\rm co} \\ 0, & v_{\rm w} > v_{\rm co} \end{cases}$$
(E1)

其中, v_{ci} 、 v_N 、 v_{co} 分别为切入、切出和额定风速; P_{wtN} 为风力机额定有功。

这样处理引起风力机捕捉风能的误差,还忽略了风电机组内部损耗,将风力机捕捉风能近似认为是风电机组出力。 从而又忽略了风电机组类型差异(DFIG或 PMSG),无法反映风电机组内部约束和具体控制特性。