

基于内点法考虑风电穿透率的区域间可用输电能力研究

李国庆¹, 孙银锋², 王利猛²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 根据鼠笼异步风力发电机(SCIM)无功功率对机端电压和有功功率的表达式,修正了原-对偶内点法中的雅可比矩阵和海森矩阵,协调了算法的计算精度与迭代效率。采用连续潮流法计算了不同节点的穿透功率极限,得到 SCIM 和恒功率因数控制的双馈感应风力发电机(DFIG)不同穿透率下的可用输电能力(ATC)值。仿真结果表明,联络区域节点接入风电场大幅提升送电区与受电区间的 ATC,而对于送电区的风电接入情况结论相反;DFIG 的功率因数对 ATC 有较大的影响;通过合理的补偿措施可解决某些并网方式下算法收敛于局部最优解的问题,多节点电压越限为陷入局部最优的主因。

关键词: 风电; 可用输电能力; 迭代效率; 局部最优; 雅可比矩阵; 海森矩阵; 穿透率; 联络区域; 模型
中图分类号: TM 614; TM 744 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.001

0 引言

当今电力系统的跨区域互联逐步扩大,如何准确地计算区域间的可用输电能力(ATC)^[1],以便在保证系统安全稳定的同时,最大限度地满足负荷需求,实现资源优化配置,从而提高经济效益,已成为亟待解决的问题^[2]。

近年来,风力发电作为一种清洁的可再生能源日益受到重视。日前发布的《风电发展“十二五”规划》中,2015 年我国风电并网装机容量将达 0.1 TW。然而,风机是否处于发电状态及出力的大小皆取决于风速状况,具有随机性和波动性的特点。为了保证风电的影响处于系统可接受范围内的同时,最大限度地提高风电的利用率,有必要对风电并网系统的 ATC 进行有效评估。文献[3]针对含有大型风电场的电力系统,应用连续潮流 CPF(Continuation Power Flow)方法对静态电压稳定约束条件下的最大输电能力进行了卓有成效的研究;文献[4]利用序贯蒙特卡罗仿真,综合考虑不确定性因素,采用关键约束下的交流潮流方法分析了风电场容量和并网位置对系统 ATC 的影响;文献[5]建立了 ATC 的风险效益模型,研究了新能源位置、输出功率不确定性、穿透率等对 ATC 的影响。显然文献[4]和[5]的共同点是皆采用了概率性方法来解决输电能力问题。另外,这些文献虽然都一定程度上涉及了风电的并网位置对 ATC 的影响,但并未深入探讨在区域间功率传输中,功率交换的区域和负荷固定区域(即联络区域)含有风电场及风电场不同穿透率对区域间 ATC 及网损等指标的影响。

对于鼠笼异步风力发电机 SCIM(Squirrel-Cage Induction Machine),由于其缺乏励磁装置,在输出有功功率的同时要从系统吸收一定的无功功率以建立磁场,即它的电压调节能力不足,不宜把它视为电压幅值恒定的 PV 节点;并且其吸收的无功功率与异步电机的滑差和风机机端电压有关,故也不能简单地视其为功率恒定的 PQ 节点^[6]。

对风电机组的节点的处理方法主要有 $P-Q$ 简化模型、 $P-Q$ 迭代模型和 $R-X$ 迭代模型 3 种^[7-8]。因没有考虑风电机组吸收的无功与滑差及有功功率的函数关系,稳态分析中所用的 $P-Q$ 简化模型较为粗略。而 $R-X$ 迭代模型和 $P-Q$ 迭代模型比传统潮流计算增加了一个迭代过程,求解时间较长,同时收敛性变差。利用风电机组机端电压、无功功率、有功功率以及滑差之间的耦合关系,可大幅节省潮流计算的时间^[9]。

本文采用能够有效而快捷地处理非线性电力系统问题的原-对偶内点法求解 ATC。为了协调迭代效率与计算精度,推导出了含有风电场的原-对偶内点法,即通过修正内点法中的雅可比矩阵及海森矩阵,充分利用风电机组有功、无功、机端电压以及滑差之间的耦合关系,减轻了计算负担。对 IEEE 30 节点测试系统不同风况、不同分区的风机并网情况下的区域间 ATC、系统网损进行仿真分析,并比较同容量同步发电机组替代风电场的情况。然后,运用连续潮流方法估算了不同节点并网风机的穿透功率极限,并在不超过此穿透功率极限的前提下,在不同的区域设置合适的风电穿透率,进而分析其输电能力。同时,研究了目前广泛应用的双馈感应风力发电机 DFIG(Doubly Fed Induction Generator)在恒功率因数控制下的穿透率对 ATC 的影响情况。此外,本文采用合理的补偿方式,有效地解决了个别

收稿日期:2013-03-24;修回日期:2013-11-22

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60934005)

Project supported by the Major Program of National Natural Science Foundation of China(60934005)

节点因风电接入而使算法陷入局部最优的问题。

1 风电场模型

1.1 风速概率分布曲线

风能具有随机性大的特点,风速的概率分布曲线是反映风能的统计特性的重要形式。拟合风速分布特性的线型主要有瑞利分布、对数正态分布、耿贝分布和威布尔分布等,而其中威布尔单峰双参数分布曲线被认为是较适合风速统计特性的概率密度函数。

风速的威布尔概率密度函数表示为:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

其中, v 为风速; c 和 k 分别为威布尔分布的尺度参数和形状参数, c 反映了平均风速的大小, k 决定了威布尔分布的形状, k 取值范围一般为 1.8~2.3, 威布尔分布已较接近正态分布。

风力机感受到的风速为轮毂高度 H 处的风速, 因此要对测风高度 H_0 处的风速 v_0 进行修正, 修正得到的风速 v' 可表示为:

$$v' = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (2)$$

其中, α 为高度修正系数, 通常在 0.1~0.4 范围内。

1.2 风电机组输出功率模型

风电机组的输出功率与风速的关系曲线称作风电机组功率特性曲线, 可以用分段函数表示:

$$p(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci}, v \geq v_{co} \\ \frac{P_N}{v_N^3 - v_{ci}^3} (v^3 - v_{ci}^3) & v_{ci} < v < v_N \\ P_N & v_N \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_N 为风机额定输出功率; v_N , v_{ci} 和 v_{co} 分别为额定风速、切入风速和切出风速。

风电机组功率特性曲线如图 1 所示。

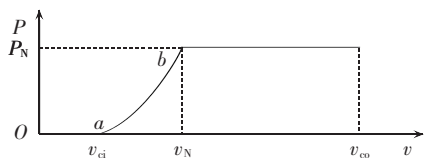


图 1 风电机组输出功率特性曲线

Fig.1 Characteristic curve of output power of wind power unit

2 含风电场节点的内点法 ATC 计算模型

a. 目标函数。

ATC 计算的目标函数为区域 A 到区域 B 的所有联络线上的有功功率与基态传输功率之差:

$$\max f(\mathbf{x}) = \sum_{i \in A, j \in B} P_{ij}(\mathbf{x}) - \sum_{i \in A, j \in B} P_{ij} \quad (4)$$

其中, $\sum_{i \in A, j \in B} P_{ij}$ 为区域 A 到区域 B 所有联络线上的基

态潮流; $\sum_{i \in A, j \in B} P_{ij}(\mathbf{x})$ 为区域 A 到区域 B 所有联络线上的现有有功功率; $\mathbf{x}$ 为状态变量; $i \in A$ 、 $j \in B$ 表示节点 i 、 j 分别为区域 A 和区域 B 中的节点。

b. 等式约束。

等式约束即潮流方程约束:

$$\begin{cases} P_{gi} - P_{di} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{gi} - Q_{di} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, N 为总节点数; P_{gi} 和 Q_{gi} 分别为节点 i 的发电机有功和无功功率; P_{di} 和 Q_{di} 分别为节点 i 的负荷有功和无功功率; U_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 间相角差; $G_{ij} + jB_{ij}$ 为系统节点导纳阵中的元素。

c. 不等式约束。

不等式约束包括发电机容量限制、负荷水平约束、电压水平约束及线路过负荷约束等静态安全约束:

$$\begin{cases} P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} & i \in S_G \\ Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} & i \in S_G \\ P_{di}^{\min} \leq P_{di} \leq P_{di}^{\max} & i \in S_L \\ Q_{di}^{\min} \leq Q_{di} \leq Q_{di}^{\max} & i \in S_L \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} & i \in S_N \\ I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} & i, j \in S_N \end{cases} \quad (6)$$

其中, S_G 为所研究的送电区域内所有发电机节点集合; S_L 为所研究的受电区域内所有负荷节点集合; S_N 为所有节点集合; $P_{gi}^{\max}$ 、 $P_{gi}^{\min}$ 分别为发电机有功功率上、下限; $Q_{gi}^{\max}$ 、 $Q_{gi}^{\min}$ 分别为发电机无功功率上、下限; $P_{di}^{\max}$ 、 $P_{di}^{\min}$ 分别为负荷有功功率的上、下限; $Q_{di}^{\max}$ 、 $Q_{di}^{\min}$ 分别为负荷无功功率的上、下限; $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$ 分别为节点电压上、下限; $I_{ij}^{\max}$ 为线路的热稳限值。

针对以上高度非线性及含有大量不等式约束条件的优化潮流问题, 本文采用快捷有效的原-对偶内点法进行求解。算法本质上为拉格朗日函数、牛顿法和障碍函数三者的结合, 在保持解的原始可行性和对偶可行性的同时, 沿原-对偶路径寻得目标函数的最优解^[10]。

当 SCIM 接入系统后, 内点法寻优的修正方程中雅可比矩阵和海森矩阵要做相应的调整。首先分析风电机组的等值模型。

异步风力发电机的简化等值电路如图 2 所示, 图中, x_m 为激磁电抗, x_1 为定子漏抗, x_2 为转子漏抗, r_2 为转子电阻, s 为转差, 此处忽略了定子电阻。

令 $x = x_1 + x_2$, 容易得到下列电路关系式:

$$U = \sqrt{-P(s^2 x^2 + r_2^2) / (r_2 s)} \quad (7)$$

$$Q = -(U^2 / x_m + P x s / r_2) \quad (8)$$

由式(7)导出:

$$s = (-U^2 r_2 + \sqrt{U^4 r_2^2 - 4 P^2 x^2 r_2^2}) / (2 P x^2) \quad (9)$$

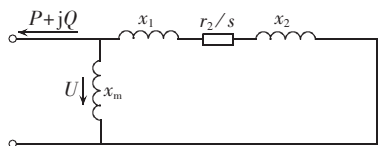


图 2 异步发电机的简化等值电路

Fig.2 Simplified equivalent circuit of asynchronous generator

将式(9)代入式(8)得到:

$$Q=f(U)=-U^2/x_m+(-U^2+\sqrt{U^4-4P^2x^2})/(2x) \quad (10)$$

式(10)表明,异步风力发电机吸收的无功功率 Q 是机端电压 U 的函数。

原-对偶内点法中,由牛顿法求解最优条件式可得修正方程:

$$H(x, \lambda, u, v) \Delta x + J^T(x) \Delta \lambda + B^T(x) (\Delta u + \Delta v) = -\partial f(x)/\partial x - J^T(x) \lambda - B^T(x) (u + v) = -L_{x0}$$

$$J(x) \Delta x = -g(x) = -L_{\lambda 0}$$

$$B(x) \Delta x + \Delta s_u = -(h(x) - h_{\max} + s_u) = -L_{u0}$$

$$B(x) \Delta x - \Delta s_d = -(h(x) - h_{\min} - s_d) = -L_{v0}$$

$$[s_u] \Delta u + [u] \Delta s_u = -([s_u] u - \mu e) = -L_{s_u0}$$

$$[s_d] \Delta v + [v] \Delta s_d = -([s_d] v + \mu e) = -L_{s_d0}$$

最终可以归结为修正方程的求解。而通过修正方程式的化简得到的降阶修正方程如下:

$$\begin{bmatrix} \hat{H} & J^T(x) \\ J(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{g} \\ -g(x) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta s_u = -(B(x) \Delta x + L_{u0}) \\ \Delta s_d = B(x) \Delta x + L_{v0} \\ \Delta u = [s_u]^{-1} ([u] (B(x) \Delta x + L_{u0}) - L_{s_u0}) \\ \Delta v = -[s_d]^{-1} ([v] (B(x) \Delta x + L_{v0}) + L_{s_d0}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\hat{H} = H + B^T(x) ([s_u]^{-1} [u] - [s_d]^{-1} [v]) B(x)$$

$$\hat{g} = -L_{\lambda 0} - B^T(x) ([s_u]^{-1} ([u] L_{u0} - L_{s_u0}) - [s_d]^{-1} ([v] L_{v0} + L_{s_d0}))$$

其中, x 为各节点电压的幅值和相角的向量, s_u, s_d 为引入的松弛变量, 分别对应不等式约束的上、下限, x, s_u, s_d 称为原始变量; λ, u, v 分别为对应的拉格朗日乘子, 称为对偶变量; μ 为障碍因子; $J(x)$ 为等式约束 $g(x)$ 的雅可比矩阵; e 为元素全为 1 的列向量; $B(x)$ 为不等式约束 $h(x)$ 的雅可比矩阵; $h_{\max}, h_{\min}$ 分别为不等式约束上、下限组成的向量; $[u], [v], [s_u], [s_d]$ 分别为以 u, v, s_u, s_d 的元素为对角元所构成的对角阵。这种处理的结果是降阶修正方程的维数仅取决于等式约束的维数, 而无关不等式约束的维数, 有效地保证了算法对电力系统规模的不敏感性。此外, 将 $\Delta s_u, \Delta s_d, \Delta u, \Delta v$ 的方程放在修正方程以外来求解, 也将有助降低修正方程的维数, 使修正方程的系数矩阵仅由海森矩阵和雅可比矩阵构成, 简化

了计算。

原-对偶内点法在计及风机节点之后, 根据上面提到的风电机组功率特性曲线, 在一定的风况下, 可视为连有风电机组的节点有功功率为已知量, 而由式(10)可知, 涉及到风电场的节点, 其潮流方程等式约束相应的雅可比矩阵和海森矩阵需做一定的修正, 即分别叠加该点无功不平衡量对机端电压的一阶偏导和二阶偏导。潮流方程约束对应的雅可比矩阵为:

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial \Delta P_1}{\partial U_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_1} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} & \dots & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_i} & \dots & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_i} \end{bmatrix} \quad (13)$$

含有风电场的节点相应叠加修正量为:

$$\partial \Delta Q_i / \partial U_i = -2U_i / x_m + (-U_i + U_i^3 / \sqrt{U_i^4 - 4P^2x^2}) / x \quad (14)$$

潮流方程约束的无功功率对状态变量求二阶偏导而得到的海森矩阵如下^[11]:

$$\sum_{i=1}^N H_Q' = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial \theta_1^2} & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial \theta_1 \partial U_1} & \dots & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial \theta_1 \partial \theta_i} & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial \theta_1 \partial U_i} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial U_i \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial U_i \partial U_1} & \dots & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial U_i \partial \theta_i} & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial U_i^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

同理, 含有风电场的节点相应叠加修正量:

$$\partial^2 \Delta Q_i / \partial U_i^2 = -2 / x_m + \{-1 + [3U_i^2 / \sqrt{U_i^4 - 4P^2x^2} - 2U_i^6 / \sqrt{(U_i^4 - 4P^2x^2)^3}]\} / x \quad (16)$$

3 基于连续潮流的风电穿透功率极限

风电穿透功率可定义为在满足一定技术指标的前提下接入系统的最大风电场装机容量与系统最大负荷的百分比^[12-13]。

作为静态电压稳定性分析的一种方法, 连续潮流通过追踪系统中各个节点电压随负荷变化的曲线确定出系统稳定运行点变化轨迹, 方便地用于负荷裕度计算^[14]。本文计算风电场穿透功率的目标是基于现有的运行方式, 计及发电机出力限制, 以及节点电压和线路热稳定限制等安全约束条件, 使得本区域内的风电场装机容量达到最大。计算步骤如下:

- 设某区域节点的风电场为最大装机容量且满发(视为 PQ 节点), 根据算例输入初始数据;
- 分别增加其他常规发电机组出力和各个节

点负荷,进行连续潮流计算;

c. 检查是否有线路过载或节点电压越限,若有则转至步骤 e,否则进行下一步;

d. 按一定步长增加风电场容量,返回步骤 b;

e. 若负荷裕度 $\lambda < 0.001$,则记录此时的风电场装机容量作为此节点的风电穿透功率极限估算值,否则转至步骤 d。

显然,在系统某节点的风电穿透率达到极限时,系统的负荷裕度已经很小,即系统在微小的负荷波动下将失去稳定。本文将利用此穿透功率极限结果,合理设定各区域风电穿透率,进而分析其对输电能力的影响。

4 算例分析

为了验证本文所提出的模型及算法的有效性,本文在 MATLAB7.0 环境下对 IEEE 30 节点系统进行了仿真计算。首先将系统划分为区域 A、B、C 这 3 个区域,如图 3 所示。将包含 40 台风力发电机(额定功率 500 kW)的风电场通过变压器和 110 kV 线路分别接入系统的不同节点。即等效为风力发电机组的额定功率取 $P_N=20$ MW,其他各相关量 $v_{ci}=3$ m/s, $v_{co}=20$ m/s, $v_N=14$ m/s。仿真中轮毂高度处的风速可由威布尔分布曲线事先预测得到,亦可在程序中键入。通过对区域 A 至区域 B 输电能力的大量仿真计算,发现区域 B(即受电区)在计算中负荷基本上都已达到上限,从而导致 ATC 计算结果相近。便于研究,本文提高了区域 B 各负荷节点的有功上限。

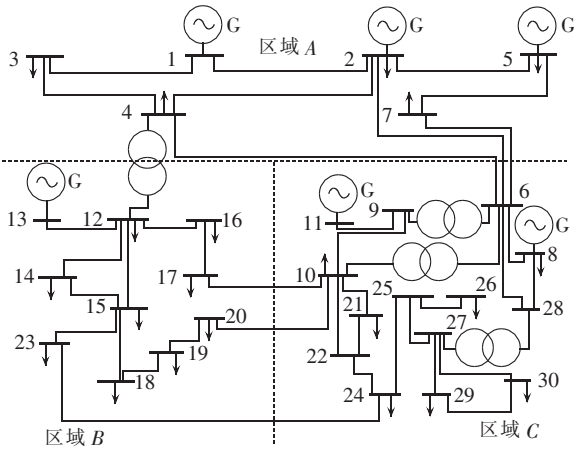


图 3 IEEE 30 节点测试系统
Fig.3 IEEE 30-bus test system

4.1 不同风况和风电场并网位置仿真

对风电不同并网区域的区域 A(送电区)到区域 B(受电区)的 ATC 仿真结果如表 1 所示(未考虑尾流效应),其中括号内数值为迭代次数(后同)。易见,迭代次数随着风速的上升而增加。另外,在风速

表 1 区域 A 到区域 B 的 ATC
Tab.1 ATC from area A to area B

风机并网节点	ATC/MW		
	风速 2 m/s	风速 10 m/s	风速 17 m/s
3	68.61(22)	68.08(23)	67.75(24)
7	68.63(22)	69.48(28)	69.82(94)
4	68.56(20)	67.92(22)	67.09(23)
18	68.55(22)	68.68(21)	68.26(22)
12	68.25(21)	72.18(31)	76.41(34)
21	68.81(20)	74.36(23)	80.74(41)
26	68.86(20)	72.53(23)	51.38(33)
25	68.79(18)	73.06(40)	74.35(79)
30	68.78(19)	73.14(38)	71.93(39)

为 2 m/s 时,风机有功出力为 0(可视为风机出力骤降的运行方式),但不同节点的风电并网输电能力略有差别,其主要源于网架结构的影响,而由于风电在此时并未与电网脱离,依然要从电网吸收一定的无功功率,从而影响了系统的潮流分布。图 4 所示为节点 18 在风速为 2 m/s 时,风电场吸收的无功功率(标么值)在迭代过程中的变化曲线。另外,观察可知,风电并网节点处于区域 C(联络区域)时(除节点 30),无论何种风况下都将使其他两区域间的 ATC 值较大,相反,若风电场并网点选在区域 A 则此数值将偏小。因为区域 C 的风电场供给了一部分此区域内的固定负荷,从而使送电区直接与受电区的功率交换增多,而通过联络区域送往受电区的功率减少,且区域 A 对区域 C 内负荷的远距离输电也将减少,极大地降低了传输过程中的各种约束条件越限的可能性,从而提高了输电能力。相反,如果区域 A 含有风电场,那么只是减少了区内其他常规机组的出力,对区域间的功率传输影响不明显。

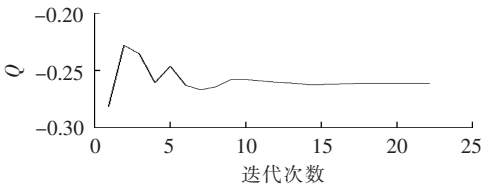


图 4 风力发电机无功功率变化曲线
Fig.4 Variation curve of reactive power of wind power generator

4.2 陷入局部最优解的处理

图 5 为风电接入系统远端的节点 30 且风速为 17 m/s 情况下,算法程序终止时得到的各个节点电压(标么值,后同)和支路传输容量裕度(标么值,后同)的投影曲线,图中支路 42 为风电场节点 31 至接入的系统节点之间的支路,其他支路标号详见文献[14]。为了便于分析,采用的支路传输容量裕度定义为:各支路传输功率与其支路容量限值的差值的绝对值,即 $\Delta P_{i-j} = |P_{ij} - P_{ijmax}|$, P_{ijmax} 为线路的传输功率上限。

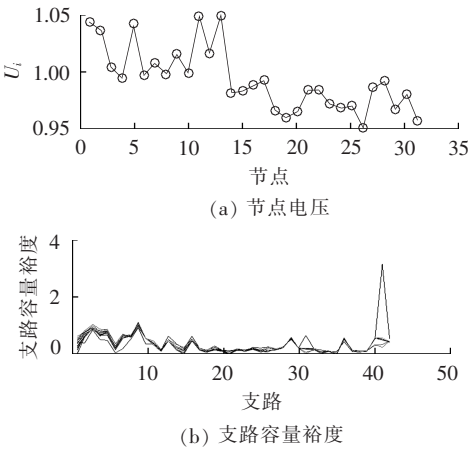


图 5 局部最优时的节点电压及支路容量裕度
Fig.5 Bus voltage and line capacity margin at local optimum

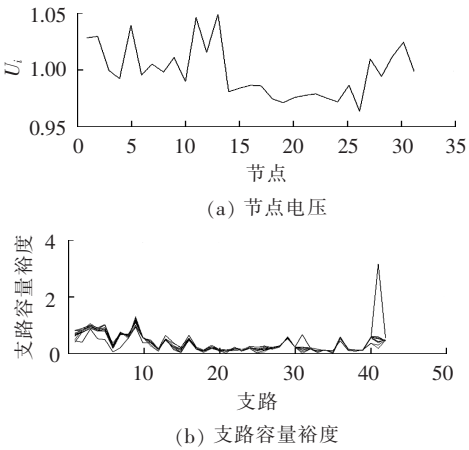


图 7 全局最优时的节点电压及支路容量裕度
Fig.7 Bus voltage and line capacity margin at global optimum

此时的潮流方程约束变量 $g'(\mathbf{x})$ 如图 6(a) 所示。扩展节点标号数量为 $2N+1$ 。特别地,因风电接入节点有功在风速给定情况下视为已知量,而无功量未知,即横坐标 61 对应的是风电注入节点 $g'(\mathbf{x})$ 中的无功不平衡量,而其他奇、偶节点标号分别对应 $g'(\mathbf{x})$ 的有功和无功不平衡量。由图可见,此时得到的最优解为局部最优。

为了处理局部最优解,并充分利用已有的无功电源,本文考虑用经典的转置雅可比矩阵法^[17]来求得网损微增率,将此时局部最优解的各个变量代入矩阵,求得网损微增率大的节点,若此节点含有无功源,则相应地减小其无功补偿量,重新应用内点法解算输电能力,反复此过程,直至跳出局部最优得到全局最优解。对于含有风电场的转置雅可比矩阵与前面的雅可比矩阵处理方法相似,即需要叠加无功不平衡量对机端电压的一阶偏导。

经过仿真计算,下调了节点 10 的无功补偿容量,并调整内点法的中心参数至 0.15。经调整后的仿真结果如图 6(b)和图 7 所示。同时,对比图 7 和

图 5 也可看出,导致算法陷入局部最优的主要影响因素是多个节点临界电压限制,而线路容量越限的影响相对不明显。因而也可以通过检测节点电压越限情况来判断局部最优解的产生并采取相应措施。可见对于远离区域边界的节点风电容量要适当,否则不但容易陷入局部最优,而且对输电能力有消极影响。

4.3 同步电机与风电的并网比较

表 2 所示为同容量的同步电机于相同位置(视为 PQ 节点)替代风电场时的 ATC(风速为 17 m/s)及系统网损情况,与风电机组并网运行的 ATC(表 1)和网损值(表 2)进行比较,容易看出 ATC 在数值上相差不大,而区域 A 和区域 C 在接入风电时可在一定程度上降低网损,并且在相同的输电交易容量中节约了更多的化石能源。ATC 值的不同源于前面推导的 SCIM 吸收的无功功率,随着优化迭代过程中机端电压的变化而改变。至于网损降低则是由于在 ATC 的解算过程中,位于区域 A 和区域 C 的风电节点的无功功率被优化为尽量减小本区域损耗而最大限度地将电能送入区域 B;相反,若区域 B 存在风电场节点,那么优化算法将极易通过调整风电场无功功率而使区域 B 的网损增大以获得区域 A 更多的电能。风电场容量和同步机的功率因数将对结果产生一定影响,此处不加赘述。

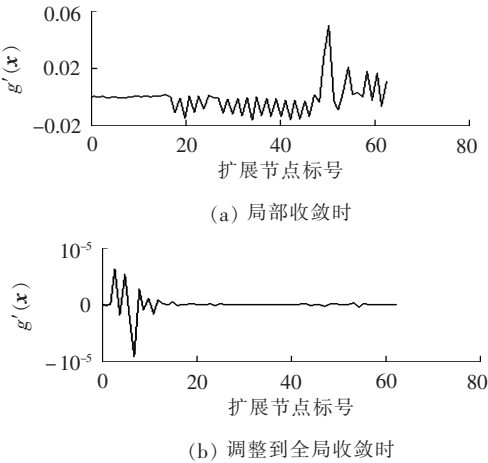


图 6 调整前后的潮流不平衡量

Fig.6 Power flow imbalances before and after regulation

表 2 同容量同步电机并网的 ATC 及网损
Tab.2 ATC and power loss when synchronous generator with same capacity is connected to grid

并网节点	ATC/MW	网损值/MW	
		同步机并网	风电并网
3	67.67(23)	11.33	11.23
7	69.08(29)	11.27	10.91
18	66.86(26)	12.18	12.28
12	75.11(27)	13.13	13.22
21	90.94(26)	13.34	12.29
26	67.27(36)	14.63	12.57

4.4 各区域不同风电穿透率对输电能力的影响

为了在不违背系统安全稳定限制的前提下,合理地设置风电穿透率,本文计算了不同区域内节点风电并网的穿透功率极限。

应用前面提到的连续潮流方法进行仿真,图 8(a)表示风电接入区域 A 节点 3 且风电容量为 20 MW 时的 $\lambda-U$ 曲线,由于计及了节点电压及线路传输容量约束,当 $\lambda=1.408\ 1$ 时,12、14 等 10 个节点电压达到下限 0.95 p.u.;支路 21-22 的传输功率越限,连续潮流终止。随着风电场容量的不断增加,易见使连续潮流终止的 λ 逐渐减小, $\lambda-U$ 曲线越来越平直(图 8(b)),即系统的负荷裕度越来越小。采用试探法,当风电容量为 65.19 MW 时, $\lambda-U$ 曲线已相当平直(图 8(c)), $\lambda=0.000\ 97$,负荷裕度已非常小),此时 10、12、14 等 14 个节点电压到达电压上限 1.05 p.u.;而节点 31 电压临界下限电压 0.9 p.u.;另外,节点 1 的发电机达到无功调节上限 60 Mvar。如果此时风电容量再增加 0.001 MW,连续潮流 $\lambda=0$,程序退出运行,记录此时的风电装机容量值为该节点接入风电的穿透功率极限估算值。采用同样方法可求得节点 3、18、21 作为风电场并网节点时穿透功率极限分别为 23.00%,10.62%、18.66%(系统最大负荷为 283.4 MW),从而取不超过此范围的各节点的穿

透率数值(假设可选择适当的风电机组使装机容量达到任意值),并计算其 ATC,结果列于表 3,表中括号内表示实际容量值。显然,对于送电区的节点 3 接有 SCIM 时,随着穿透率的增大,ATC 值略有减小。这是由于区域 A 大量的风电场出力取代了常规机组,此时风电场无功吸收量增大,而常规机组的无功出力反而减少,使得某些常规机组无功出力越限。

表 3 SCIM 不同穿透率下的 ATC
Tab.3 ATC of SCIM for different penetration levels

风电穿透率/%	ATC/MW		
	并网节点 3	并网节点 18	并网节点 21
3.53(10 MW)	67.81	67.71	72.22
7.06(20 MW)	67.75	68.26	80.74
10.62(30.09 MW)	65.84	70.55	84.77
18.66(52.88 MW)	65.24	—	93.02
23.00(65.19 MW)	64.63	—	—

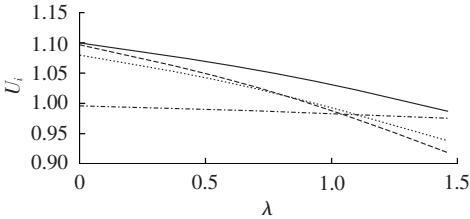
然而受电区和联络区域的情况恰恰相反,尤其是当联络区域(节点 21)含有风电场时,ATC 随着穿透率的上升而显著提高。导致 ATC 值增大的原因与 4.1 节中的情形相似。

下面分析 DFIG 不同分区中的穿透率对区域间输电能力的影响,ATC 结果列于表 4。DFIG 转子回路通过接在滑环上的电力电子变频器与电网相连,定子则直接连于电网。其优点是具有无功控制能力,从而提供电网电压支持;并且可以实现有功功率和无功功率的解耦控制,即独立控制转矩和转子励磁电流。

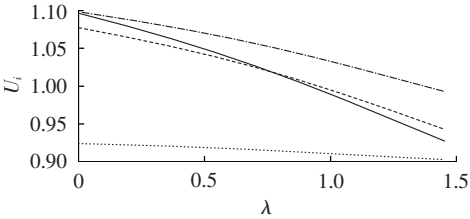
表 4 DFIG 不同穿透率下的 ATC
Tab.4 ATC of DFIG for different penetration levels

风电穿透率/%	$\cos \theta$	ATC/MW		
		并网节点 3	并网节点 18	并网节点 21
3.53	-0.99	67.11	67.55	72.60
	1.00	67.13	67.60	72.49
	0.99	67.14	67.65	72.38
7.06	-0.99	66.70	67.15	80.87
	1.00	66.73	67.23	80.53
	0.99	66.75	67.32	80.08
10.62	-0.99	66.30	66.48	89.94
	1.00	66.34	66.61	89.66
	0.99	66.11	68.52	88.72

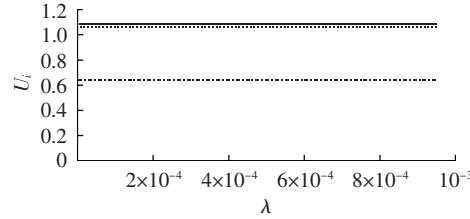
计算中 DFIG 采用恒功率因数控制方式,即 $\cos \theta$ 值给定,分别取为 -0.99、1.00 和 0.99(根据电网优化运行方案)。可见,随着位于送电区和受电区 DFIG 穿透率的增长,ATC 值呈现降低趋势,相同穿透率下风机的功率因数变化 ATC 值波动不大;而同样穿透率下的 DFIG 位于联络区域时,其输电能力值明显大于另外 2 个区域,同时随着穿透率的增大,ATC 值也有显著提升,其原因类似于前面的 SCIM。另外,在联络区域同样的风电穿透率下,ATC 对 $\cos \theta$



(a) 风电容量为 20 MW



(b) 风电容量为 40 MW



(c) 风电容量为 65.19 MW

——节点 10, ----节点 15,节点 30, - - - -节点 31

图 8 节点 3 不同风电并网容量的 $\lambda-U$ 曲线

Fig.8 $\lambda-U$ curve of bus 3 for different grid-connecting capacities of wind farm

值的变化较敏感。当 $\cos \theta$ 为负即滞后功率因数时, ATC 值最大。这是由于联络区域的 DFIG 通过对其无功出力的调节,不但支持了本区域内的有功负荷,同时也影响了一部分区域内的无功负荷。DFIG 发一定无功功率时,送电区直接与受电区的功率交换增大,并且送电区对联络区域负荷的远距离输电减小,所以传输过程中的各种约束条件越限的可能性大为降低,从而提高了输电能力。同理,当电网较强,DFIG 调节为只发有功功率($\cos \theta = 1.00$)时, ATC 值次之;而 DFIG 根据运行需要类似 SCIM 从系统吸收一定无功($\cos \theta = 0.99$)时, ATC 值为此风电穿透率下最小。

5 结论

本文分析了风电并网系统的区域间 ATC,通过修正含风电场原-对偶内点法中的雅可比矩阵与海森矩阵来解决计算精度与程序运行速度之间的矛盾。计算结果得出以下结论。

a. 风速的上升会使 ATC 计算的迭代次数增加,任何风况下联络区域的适当节点接入风电场相对于送电区都将显著提高 ATC 值。

b. 最大化区域间功率传输功率时,送电区和联络区域含风电场时的网损值要小于同容量的同步发电机并网的情形。

c. 随着穿透率的提高,对于 SCIM,当联络区域接入风电场时可极大提高 ATC 值,而送电区含风电场时却对 ATC 作用效果相反;而对于 DFIG 的并网情况相似,但在其不同的功率因数控制下对 ATC 产生的影响不同。

d. 使计算陷入局部最优的情况易发生在远离区域边界的节点,其主要原因是多个节点电压越限,故可据此判断局部最优解的产生,另外采用本文的方法可有效地跳出局部最优。

本文接续的研究目标是针对 DFIG 的功率优化控制追踪模型编写程序,计算多区域风电场相互影响的动态区域间 ATC 问题。

参考文献:

- [1] North American Electric Reliability Council (NERC). Available transfer capability definitions and determination[R]. Washington D C, USA: [s.n.], 1996.
- [2] 李国庆,王成山,余贻鑫. 大型互联电力系统区域间功率交换能力研究综述[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):21-25.
LI Guoqing, WANG Chengshan, YU Yixin. A survey on transmission transfer capability of interconnected electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 21-25.
- [3] 孙玮. 含大型风电场的电力系统最大输电能力计算[D]. 天津:天津大学,2007.

SUN Wei. Total transfer capability calculation of power system including large scale wind farm[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

- [4] 周明,冉瑞江,李庚银. 风电并网系统可用输电能力的评估[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):14-21.
ZHOU Ming, RAN Ruijiang, LI Gengyin. Assessment on available transfer capability of wind farm incorporated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 14-21.
- [5] 王俊,蔡兴国,季峰,等. 考虑新能源发电不确定性的可用输电能力风险效益评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(12):108-112.
WANG Jun, CAI Xingguo, JI Feng, et al. Evaluation of risk and benefit of ATC relating to uncertainty of renewable energy power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 108-112.
- [6] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2006.
CHI Yongning. Studies on the stability issues about large scale wind farm grid integration [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2006.
- [7] 吴峻岭,周双喜,孙建锋,等. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术,2004,28(20):28-32.
WU Junling, ZHOU Shuangxi, SUN Jianfeng, et al. Analysis on maximum power injection of wind farm connected to power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 28-32.
- [8] FELJOO A, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [9] 陈金富,陈海焱,段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报,2006,26(3):31-35.
CHEN Jinfu, CHEN Haiyan, DUAN Xianzhong. Multi-period dynamic optimal power flow in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 31-35.
- [10] WEI H, SASAKI H, YOKOYAMA R. An application of interior point quadratic programming algorithm to power system optimization problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 870-877.
- [11] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003: 120-134.
- [12] SCHLUETER R A. Modification of power system operation for significant wind generation penetration[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(1): 153-161.
- [13] 申洪,梁军,戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J]. 电网技术,2002,26(8):8-11.
SHEN Hong, LIANG Jun, DAI Huizhu. Calculation of wind farm penetration based on power system transient stability analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 8-11.
- [14] 李国庆,李小军,彭晓洁. 计及发电报价等影响因素的静态电压稳定分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(22):35-40.
LI Guoqing, LI Xiaojun, PENG Xiaojie. Static voltage stability analysis considering influencing factors such as generation bidding[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 35-40.
- [15] 康忠健,辛士郎,仲崇山,等. 双馈风电场穿透率增加对电力系统稳定影响综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):94-99.
KANG Zhongjian, XIN Shilang, ZHONG Chongshan, et al. Impact

(下转第15页 continued on page 15)

模型[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):57-61.

YAN Zhimin,WANG Chengmin,ZHENG Jian,et al. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(2):57-61.

[21] 张国驹,唐西胜,齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):85-89.

ZHANG Guojun,TANG Xisheng,QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitor and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(12):85-89.

作者简介:



李 斌

李 斌(1976-),男,甘肃兰州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:binli@tju.edu.cn);
宝海龙(1988-),男,辽宁北票人,硕士研究生,主要研究方向为分布式发电、微电网的保护与控制(E-mail:bhl@tju.edu.cn);
郭 力(1981-),男,山东济宁人,副教授,博士,主要研究方向为分布式发电、微电网系统(E-mail:liguo@tju.edu.cn)。

Strategy of energy storage control for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems

LI Bin,BAO Hailong,GUO Li

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China)

Abstract: The stable operation and energy balance of islanded microgrid and its traditional energy management strategy are analyzed and a strategy of adaptive power control is proposed for its hybrid battery-supercapacitor storage system. In order to meet the requirements of islanded microgrid for both power quality and load and enhance the system economics over lifetime,the output power of hybrid battery-supercapacitor storage system is reasonably allocated between supercapacitor and battery by its high-level energy management. A PSCAD/EMTDC model of islanded microgrid is built to verify the validity of the proposed strategy,which optimizes the working process of battery,prolongs its service life,cancels the data collection and communication and improves the operational reliability and stability of islanded microgrid.

Key words: microgrid; energy storage; electric batteries; photovoltaic generation system; islanded operation; adaptive control

(上接第 7 页 continued from page 7)

of ride-through power increase of DFIG-based wind farm on power system stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):94-99.

[16] CASTRO R,FERREIRA L A. Comparison between chronological and probabilistic methods to estimate wind power capacity credit[J]. IEEE Trans on Power Systems,2001,16(4):904-909.

[17] ALVARADO F L. Penalty factors form Newton's method[J]. IEEE Trans on PAS,1978,97(6):2030-2040.

[18] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.

ZHANG Liying,YE Tinglu,XIN Yaozhong,et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):1-9.

作者简介:



李国庆

李国庆(1963-),男,吉林长春人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统的安全性及稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化(E-mail:lgq@mail.nedu.edu.cn);

孙银锋(1983-),男,吉林四平人,博士研究生,研究方向为电力系统安全性与稳定性分析(E-mail:syf5883@163.com);

王利猛(1971-),男,吉林吉林人,副教授,博士研究生,研究方向为电力系统安全性与稳定性分析。

Interregional available transfer capability research based on interior point method with consideration of wind power penetration level

LI Guoqing¹,SUN Yinfeng²,WANG Limeng²

(1. School of Electrical Engineering,Northeast Dianli University,Jilin 132012,China;

2. School of Electrical and Electronics Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: According to the expression of reactive power by terminal voltage and active power for SCIM (Squirrel-Cage Induction Machine),the Jacobian and Hessian matrices of primal-dual interior point algorithm are modified to coordinate its calculation accuracy and iteration efficiency. The continuation power flow algorithm is adopted to calculate the penetration limit for different buses and the ATC(Available Transfer Capability) of SCIM and DFIG(Doubly Fed Induction Generator) controlled by constant power factor under different penetration levels are obtained. Simulative results show that,the wind farm connecting to the tie-area may significantly improve the ATC between sending and receiving areas while the wind farm connecting to the sending area may worsen the ATC;the power factor of DFIG has larger influence on ATC;and multiple bus-voltage limit-violation may induce the local optimum of algorithm under some grid-connection modes,against which reasonable compensation measures should be applied.

Key words: wind power; available transfer capability; iteration efficiency; local optimum; Jacobian matrices; Hessian matrices; penetration level; tie-area; models