

1. 一种计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化方法,其特征是,其工作步骤如下:

步骤一:开始;

步骤二:分为三个分支 A、B、C,这三个分支并发进行;

分支 A:采集风功率历史数据,对不同周期下风功率分布规律进行分析;

分支 B:采集无功补偿设备性能参数;

分支 C:采集双馈感应发电机 DFIG 性能参数,对 DFIG 的 P-Q 解耦进行特性分析,进行风电场节点在潮流计算中的处理;

步骤三:利用无功补偿容量优化模型进行优化处理,优化的目标为:无功补偿的投资成本、因无功功率引起的风电系统运行成本均达到最小化;进行运行成本和投资成本的计算;其中运行成本中包含了风功率分布结果和功率特性的影响;

步骤四:利用粒子群算法结合潮流计算程序进行优化计算;

所述步骤二的分支 C 中,潮流计算中风电场节点的处理具体描述如下:

考虑 DFIG 机组特性,在潮流计算中将风电节点作为 PV 节点进行分析处理,其有功功率值按分布规律所得结论进行,无功调节范围按机组特性及有功功率值进行分段计算;风电场节点的有功功率值如式(1)所示,

$$P_w = \sum_{i=1}^m P_{g,i} \quad (1)$$

式(1)中: $P_{g,i}$ 为第 i 台机组有功功率值; m 为风力发电机组数量;

当 $P_w < mP_0$ 时,风电场无功调节范围如式(2)所示,此时风场具有较充裕的无功调节能力; P_0 为有功功率;

$$Q_w \in \left\{ \sum_{i=1}^m Q_{g,i}^{\min} - Q_{Loss}, \sum_{i=1}^m Q_{g,i}^{\max} - Q_{Loss} \right\} \quad (2)$$

当 $P_w > mP_0$ 时,风电场无功调节范围如式(3)所示,该调节范围多受机组性能影响,其上限通常处于零值附近;

$$Q_w \in \left\{ -n \frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} - Q_{Loss}, -n \frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} + S_r - Q_{Loss} \right\} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中, $Q_{g,i}^{\max}$, $Q_{g,i}^{\min}$ 为第 i 台机组无功功率上下限; Q_{Loss} 为风电场无功损耗,包括变压器及输电线路损耗功率, n 为所接入电网的网络节点数量; X_{ss} 为定子漏抗与励磁电抗之和; U_s 为定子侧端电压; S_r 为转子侧视在功率;

实际中若按机组处理,则数据量过于庞大,数据获取亦存在难度,且影响计算速度;根据风速分布,将其聚合为 1 组具有典型特征的机群进行计算,每组机群按所处位置与来风向设定分配系数;如此在保证计算精度条件下,显著减少历史数据需求量与计算量。

2. 如权利要求 1 所述的一种计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化方法,其特征是,所述步骤二的分支 A 中,风功率分布规律分析的具体描述如下:

(1)风功率的时间分布规律,在年度时间窗口下,气候变化具有明显的周期性规律,直接

受气候影响的风功率随之具有同样的变化趋势,将其称之为趋势性规律;

(2)风功率的空间分布规律,受地理位置及所处地形信息影响,风功率通常会有较强的区域特性,称其为区域性差异;

利用基于历史风速数据计算得到的风功率估算值数据分析、提取风功率分布规律,形成包含有充分特征信息的风电场输出功率分布函数;估算功率表达如式(4)所示;

$$P_w = P_i, i = 1, 2 \cdots n; \quad (4)$$

式中: P_w 为风电场的有功功率值; P_i 为依据第*i*个记录点的风速得到的有功估算值; n 为分析周期内所收集信息的数量;

设 $N(P)$ 为 $P_w \in \{P, P + \Delta P\}$ 的总次数,则定义式(5)为有功功率年度周期内的概率分布函数;

$$\varphi(P) = \frac{N(P)}{\sum_{P_w = \min\{P_1, P_2, \dots, P_n\}}^{\max\{P_1, P_2, \dots, P_n\}} N(P_w)} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中, $\varphi(P)$ 表示功率值为*P*出现的概率;

在历史数据充分条件下,通过多年度数据加权求均值,提高分布规律统计的精度。

3. 如权利要求1所述的一种计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化方法,其特征是,所述步骤二的分支C中,DFIG的功率特性分析具体描述如下:

DFIG通过变频器调控实现转子电流励磁分量与转矩分量解耦控制,从而达到有功、无功功率解耦;由此实现风电场参与并网点及接入系统无功电压调节;

DFIG定、转子侧功率方程为:

$$P_s^2 + (Q_s + \frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}})^2 = \frac{|\dot{U}_s|^2 x_m^2}{X_{ss}^2} (I_{qr}^2 + I_{dr}^2) \leq \frac{|\dot{U}_s|^2 x_m^2}{X_{ss}^2} I_{rmax}^2 \quad (6)$$

$$Q_r^2 \leq S_r^2 - P_r^2 \quad (7)$$

式(6)和式(7)中, P_s 、 Q_s 、 U_s 为定子侧有功功率、无功功率与端电压; x_m 为励磁电抗; X_{ss} 为定子漏抗与励磁电抗之和; I_{qr} 、 I_{dr} 为转子电流交轴与直轴分量; I_{rmax} 即为转子电流最大值; P_r 、 Q_r 、 S_r 为转子侧有功功率、无功功率及视在功率;

结合式(6)、式(7),机组无功功率 $Q_g = Q_s + Q_r$ 推得DFIG的无功可调节范围为:

$$Q_g \in \left\{ -Q_y - \frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} - S_r, Q_y - \frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} + S_r \right\} \quad (8)$$

式(8)中, $Q_y = \sqrt{|\dot{U}_s|^2 x_m^2 / X_{ss}^2 - P_s^2}$;

当 Q_g 的调节上限等于零时,DFIG对应有功功率为 P_0 ,该值表征机组无功调节的临界点;

$$P_0 = \frac{|\dot{U}_s|}{X_{ss}} \sqrt{x_m^2 I_{rmax}^2 - |\dot{U}_s|^2} + S_r \quad (9)$$

根据式(6)~式(9)知,当 $P_g < P_0$ 时,机组有功输出功率偏小,转子电流励磁分量可调节范围较大,此时发电机可调节输出感性或者容性无功功率;当 $P_g > P_0$ 时,机组有功输出功率偏大,转子电流励磁分量可调节范围较小,机组仅可调节输出容性的无功功率, P_g 为DFIG机组实际发出的有功功率。

4. 如权利要求1所述的一种计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化方法,其特征是,所述步骤四的具体步骤为:

- (1) 置风电机组、线路、变压器参数,置接入系统网络、元件参数;
- (2) 置粒子群维数 K_{PSO} ,最大迭代数 N_{PSOMAX} ,计算精度 σ_{PSO} ,置潮流计算最大迭代次数 N_{PFMAX} ,潮流计算精度 σ_{PF} ;
- (3) 置 P_w 变化范围并赋初始值,计算对应 P_w 条件下的 Q_s 边界条件;
- (4) 初始化粒子群的位置与速度,即给定当次计算下的 Q_s 值;
- (5) 接入系统潮流计算初始化;
- (6) 代入 P_w 与 Q_s 计算包含风电场的接入系统潮流分布情况;
- (7) 若迭代收敛或迭代次数大于 N_{PFMAX} ,则保留潮流计算结果,继续计算,否则更新初值,返回步骤(4);
- (8) 按式(10)所示计算所求粒子适应度值;
- (9) 将每个粒子适应度值与其个体极值进行比较,如较优则更新当前个体极值 P_{id} ;
- (10) 将每个粒子适应度值与全局极值进行比较,如较优则更新当前全局极值 P_{gd} ;
- (11) 根据式(18)~(19)更新每个粒子的位置与速度,依据式(5)更新当前边界条件,并校验更新后粒子是否满足约束条件要求,如不满足,重新生成粒子速度、更新位置,直至满足约束条件,若重复次数超过定值则以原可行粒子代替;

$$v_{id}^{l+1} = \omega v_{id}^l + c_1 \zeta (p_{id}^l - x_{id}^l) + c_2 \eta (p_{gd}^l - x_{id}^l) \quad (18)$$

$$x_{id}^{l+1} = x_{id}^l + g v_{id}^{l+1} \quad (19)$$

式中: l 为当前循环次数, c_1 、 c_2 为粒子权重系数; ω 为惯性权重; ζ 、 η 为 $[0, 1]$ 内均匀分布随机数; x_{id} 、 v_{id} 为第 i 维粒子的位置与速度; g 为约束因子;

(12) 判断当前迭代次数与误差值是否满足要求,不满足则更新 P_w 值,返回步骤(3),否则终止粒子寻优计算,并输出计算结果。

计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化控制方法。

背景技术

[0002] 风电的无功电压调控问题是影响其自身乃至电网安全稳定运行的重要因素之一。

[0003] 目前,该领域研究重心集中在风电场及接入系统的无功电压协调控制方面,包括机组、风场、场群及接入系统间的协调策略等,已取得诸多研究成果。但由双馈型机组构成的风电场,其无功调节能力随有功变化存在波动性,仅依靠其自身无功进行调整难以实现一定电压水平的保持。同时,近期因无功电压问题引起风机脱网事件频发,由此,极有必要针对双馈型机组风电场的无功补偿容量问题进行深入研究。

[0004] 对此,文献[陈树勇,申洪,张洋等.基于遗传算法的风电场无功补偿有控制方法的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(8):1-6.]应用遗传算法确定风电场补偿电容器的容量与分组方案,以保证异步机风电场母线电压水平;

[0005] 文献[江岳文,陈冲,温步瀛.随机模拟粒子群算法在风电场无功补偿中的应用[J].中国电机工程学报,2008,28(13):47-52.]基于随机模拟及粒子群优化算法求取以费用最小为目标的异步机风电场最优无功补偿容量;

[0006] 文献[Yanhua Liu, Xu Zhang, Dongmei Zhao, et all. Research on the Wind Farm Reactive Power Compensation Capacity and Control Target[C]. Power and Energy Engineering Conference, 2011 Asia-pacific. 2011, page:1-5.]以异步机风电场并网点与公共连接点的电压控制为目标确定补偿容量,并给出了无功电压协调控制策略;

[0007] 文献[Li Ling, Zeng Xiangjun, Zhang Ping. Wind Farms Reactive Power Optimization Using Genetic/Tabu Hybrid Algorithm[C]. 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. 2008, page:1-5. 刘艳妮,王玮,徐丽杰等.基于遗传算法的风电场无功补偿容量的计算[J].太阳能学报,2008,29(11):1444-1448.]考虑异步发电机功率因数与机端电压水平因素影响,用遗传算法求取风电场的无功补偿容量,以上研究均只针对异步机风电场;

[0008] 文献[E. H. Camm, M. R. Behnke, O. Bolado, et all. Reactive power compensation for wind power plants[C]. Rower Energy Society General Meeting, 2009:1-7. 毛静启.利用风力发电机的无功功率补偿风电场无功损耗[J].电网技术,2009,33(19):175-180.]通过动态电压支撑能力考虑无功补偿作用,并对比不同补偿类型的补偿效果,但尚未深入分析补偿容量的问题;

[0009] 文献[Ernst Camm, Charles Edwards. Reactive compensation systems for large wind farms[C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008:1-5]探讨用变速恒频机组的无功功率以减小汇集站补偿容量配置,降低投资,但未考虑机组无功调节的能力问题。

[0010] 上述研究有一定效果,但依然存在两个问题:一是多针对异步机风电场,而双馈机

风电场也需要考虑补偿问题；二是没有考虑风电场所特有的规律信息，补偿容量确定难免存在武断性。

[0011] 文献 [王成福, 梁军, 张利, 韩学山. 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. Arantxa Tapia, erardo Tapia, J. Xabier Qstolaza. Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2003, 18(2): 194-204.] 已证明 DFIG 的无功解耦随有功输出变化存在波动性, 若不考虑补偿, 则该类型风电场无功电压协调将难以维持, 因此必须对其予以补偿; 同时, 风资源分布在时间、空间上既存在随机性, 又有其规律性, 与之对应, 每个风电场输出功率同样具有上述特性, 且各不相同, 称之为风功率所包含的规律性与个性信息。由此, 若欲实现稳定、经济的无功补偿, 则必须在充分考虑双馈型机组功率特性及风功率所包含的特性信息基础上, 求解其最优化无功补偿容量, 这是本文研究的背景。

发明内容

[0012] 本发明的目的就是为了解决上述问题, 提供一种计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化方法, 补偿容量的优化决策方法在充分保证风电系统无功功率调节连续性的前提下, 可风电场的无功补偿具有最好的经济性与最强的针对性。

[0013] 为了实现上述目的, 本发明采用如下技术方案:

[0014] 一种计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化方法, 其工作步骤如下:

[0015] 步骤一: 开始;

[0016] 步骤二: 分为三个分支 A、B、C, 这三个分支并发进行;

[0017] 分支 A: 采集风功率历史数据, 对不同周期下风功率分布规律进行分析;

[0018] 分支 B: 采集无功补偿设备性能参数;

[0019] 分支 C: 采集 DFIG 性能参数, 对 DFIG 的 P-Q 解耦进行特性分析, 进行风电场节点在潮流计算中的处理;

[0020] 步骤三: 利用无功补偿容量优化模型进行优化处理, 优化的目标为: 无功补偿的投资成本、因无功功率引起的风电系统运行成本均达到最小化; 进行运行成本和投资成本的计算; 其中运行成本中包含了风功率分布结果和功率特性的影响;

[0021] 步骤四: 利用粒子群算法结合潮流计算程序进行优化计算。

[0022] 所述步骤二的分支 A 中, 风功率分布规律分析的具体描述如下:

[0023] (1) 风功率的时间分布规律, 在年度时间窗口下, 气候变化具有明显的周期性规律, 直接受气候影响的风功率随之具有同样的变化趋势, 将其称之为趋势性规律;

[0024] (2) 风功率的空间分布规律, 受地理位置及所处地形信息影响, 风功率通常会有较强的区域特性, 称其为区域性差异;

[0025] 本发明利用基于历史风速数据计算得到的风功率估算值数据分析、提取风功率分布规律, 形成包含有充分特征信息的风电场输出功率分布函数; 估算功率表达如式 (1) 所示;

[0026]
$$P_w = P_i \quad i = 1, 2, \dots; \quad (1)$$

[0027] 式中： P_w 为风电场的有功功率值； P_i 为依据第 i 个记录点的风速得到的有功估算值； n 为分析周期内所收集信息的数量；

[0028] 设 $N(P)$ 为 $P_w \in \{P, P + \Delta P\}$ 的总次数，则定义式(2)为有功功率年度周期内的概率分布函数；

[0029]

$$\varphi(P) = \frac{N(P)}{\sum_{P_w = \min\{P_1, P_2, \dots, P_n\}}^{\max\{P_1, P_2, \dots, P_n\}} N(P_w)} \times 100\% \quad (2)$$

[0030] 式(2)中， $\varphi(P)$ 表示功率值为 P 出现的概率；

[0031] 在历史数据充分条件下，通过多年度数据加权求均值，提高分布规律统计的精度。

[0032] 所述步骤二的分支 C 中，EFIG 的功率特性分析具体描述如下：

[0033] DFIG 通过变频器调控实现转子电流励磁分量与转矩分量解耦控制，从而达到有功、无功功率解耦；由此实现风电场参与并网点及接入系统无功电压调节；

[0034] 由文献 [王成福, 梁军, 张利, 韩学山. 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.] 知, DFIG 定、转子侧功率方程为：

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}}\right)^2 = \frac{|\dot{U}_s|^2 x_m^2}{X_{ss}^2} (I_{qr}^2 + I_{dr}^2) \leq \frac{|\dot{U}_s|^2 x_m^2}{X_{ss}^2} I_{rmax}^2 \quad (3)$$

$$Q_r^2 \leq S_r^2 - P_r^2 \quad (4)$$

[0037] 式(3)和式(4)中， P_s 、 Q_s 、 U_s 为定子侧有功功率、无功功率与端电压； x_m 为励磁电抗； X_{ss} 为定子漏抗与励磁电抗之和； I_{qr} 、 I_{dr} 为转子电流交轴与直轴分量； I_{rmax} 即为转子电流最大值； P_r 、 Q_r 、 S_r 为转子侧有功功率、无功功率及视在功率；

[0038] 结合式(3)、式(4)，机组无功功率 $Q_g = Q_s + Q_r$ 推得 DFIG 的无功可调节范围为：

$$Q_g \in \left\{ -Q_y - \frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} - S_r, Q_y - \frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} + S_r \right\} \quad (5)$$

[0040] I

[0041] 式(5)中， $Q_y = \sqrt{|\dot{U}_s|^2 x_m^2 / X_{ss}^2 - P_s^2}$ ；

[0042] 当 Q_g 的调节上限等于零时，DFIG 对应有功功率为 P_0 ，该值表征机组无功调节的临界点；

$$P_0 = \frac{|\dot{U}_s|}{X_{ss}} \sqrt{x_m^2 I_{rmax}^2 - |\dot{U}_s|^2} + S_r \quad (6)$$

[0044] 根据式(3)~式(6)知，当 $P_g < P_0$ 时，机组有功输出功率偏小，转子电流励磁分量可

调节范围较大,此时发电机可调节输出感性或者容性无功功率;当 $P_g > P_0$ 时,机组有功输出功率偏大,转子电流励磁分量可调节范围较小,机组仅可调节输出容性的无功功率;

[0045] 所述步骤二的分支 C 中,潮流计算中风电场节点的处理具体描述如下:

[0046] 考虑 DFIG 机组特性,在潮流计算中将风电节点作为 PV 节点进行分析处理,其有功功率值按分布规律所得结论进行,无功调节范围按机组特性及有功功率值进行分段计算;风电场节点的有功功率值如式(7)所示,

$$[0047] \quad P_W = \sum_{i=1}^m P_{g,i} \quad (7)$$

[0048] 式(7)中: $P_{g,i}$ 为第 i 台机组有功功率值; m 为风力发电机组数量;

[0049] 当 $P_w < mP_0$ 时,风电场无功调节范围如式(8)所示,此时风场具有较充裕的无功调节能力;

$$[0050] \quad Q_W \in \left\{ \sum_{i=1}^m Q_{g,i}^{\min} - Q_{Loss}, \sum_{i=1}^m Q_{g,i}^{\max} - Q_{Loss} \right\} \quad (8)$$

[0051] 当 $P_w > mP_0$ 时,风电场无功调节范围如式(9)所示,该取值区间多受机组性能影响,其上限通常处于零值附近;

$$[0052] \quad Q_W \in \left\{ -n \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} - Q_{Loss}, -n \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} + S_r - Q_{Loss} \right\} \quad (9)$$

[0053] 式(8)、式(9)中, $Q_{g,i,\min}$, $Q_{g,i,\max}$ 为第 i 台机组无功功率上下限; Q_{Loss} 为风电场无功损耗,包括变压器及输电线路损耗功率;

[0054] 实际中若按机组处理,则数据量过于庞大,数据获取亦存在难度,且影响计算速度;根据风速分布,将其聚合为 1 组具有典型特征的机群进行计算,每组机群按所处位置与来风风向设定分配系数;如此在保证计算精度条件下,显著减少历史数据需求量与计算量。

[0055] 所述步骤三中的无功补偿容量优化模型,具体描述为:

[0056] 优化目标为:在保证双馈风电场对无功功率的需求、维持母线电压水平的稳定、并最大程度提高风电场的暂态稳定能力等条件下,使无功补偿的投资成本、因无功功率引起的风电系统运行成本均达到最小化,即实现补偿的综合效益最优化;针对两种成本的矛盾关系,以决策思想构建目标函数;因补偿容量变化引起的系统运行成本变化 F_R 如式(10)所示;目标函数如式(11)所示;

[0057]

$$F_R = \rho_P N_{year} \sum_{T=P_w}^{P_{w,N}} (\varphi(T) / \sum_{K=P_w}^{P_{w,N}} \varphi(K)) (T - P_w)$$

[0058]

$$-\rho_Q (Q_{S,P_w,N} - Q_{S,P_w}) + \rho_P P_{Loss} \quad (10)$$

$$[0059] \quad \min F = k_R F_R + k_I (\rho_Q Q_{S,P_w} + r_S) \quad (11)$$

[0060] 式(10)、(11)中, ρ_P 为有功功率对应价格; N_{year} 为机组额定运行年限; P_w 为风电场实际输出功率, $P_w \in \{0, P_{w,N}\}$, 使目标最优的 P_w 即为优化所得风电场有功输出上限 $P_{w,OPT}$; $P_{w,N}$ 为风电场额定功率; Q_{S,P_w} 为风电场输出功率为 P_w 时,考虑机组无功调节能力情况下的补

偿容量值； $Q_{S, PW, N}$ 为风电场额定输出功率情况下所需补偿容量值； ρ_q 为无功补偿装置单位容量价格； P_{Loss} 为接入地区网损； k_R 、 k_I 为运行成本、投资成本的系数； r_s 为补偿装置安装成本；

[0061] 式(10)中， $p_p(\varphi(T)/\Sigma\varphi(K))(T-P_w)$ 为年度周期内由于弃风所引起的运行成本损失，若风电场装有储能设备，则该部分价值需综合考虑储能因素进行更新计算； $\rho_q(Q_{S, PW, N}-Q_{S, PW})$ 为弃风所引起的补偿设备成本差额；

[0062] 约束条件包括接入潮流约束与风电场无功调节能力约束两部分；

[0063] 节点功率平衡约束：

$$[0064] \begin{cases} \Delta P_i = V_i \sum_{j=i}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = V_i \sum_{j=i}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

[0065] 机组输出功率约束：

$$[0066] \begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

[0067] 输电元件功率约束：

$$[0068] P\{P_{ij}^{\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max}\} \geq \beta_1 \quad (14)$$

[0069] 节点电压水平约束：

$$[0070] P\{U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}\} \geq \beta_2 \quad (15)$$

[0071] 负荷波动水平约束：

$$[0072] P\{P_{Li}^{\min} \leq P_{Li} \leq P_{Li}^{\max}\} \geq \beta_3 \quad (16)$$

[0073] 风电场无功功率约束：

$$[0074] P\{Q_{S, PW} - Q_w^{\max} \leq \sum_{i=1}^m Q_{Ti} + Q_T + Q_{Line}\} \leq \beta_4 \quad (17)$$

[0075] 上述各式中： ΔP_i 、 ΔQ_i 、 V_i 为 i 节点净有功、净无功与电压值； G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 为 i 、 j 节点间电导、电纳与相角差； N 为节点总数； P_{Gi} 、 P_{Gi}^{\max} 、 P_{Gi}^{\min} 为第 i 台机组有功功率及其上下限； Q_{Gi} 、 Q_{Gi}^{\max} 、 Q_{Gi}^{\min} 为第 i 台机组无功功率及其上下限； P_{ij} 、 P_{ij}^{\max} 、 P_{ij}^{\min} 为线路 ij 的传输功率及其上下限； U_i 、 U_i^{\max} 、 U_i^{\min} 为节点 i 的电压水平及其上下限； P_{Li} 、 P_{Li}^{\max} 、 P_{Li}^{\min} 为节点 i 的负荷水平及其上下限； $\beta_1 \sim \beta_4$ 为对应的可信度水平值； $\Sigma Q_{t, i} + Q_T$ 为箱变与并网升压变损耗； Q_{Line} 为线路总损耗，与前者之和即为 Q_{Loss} ； Q_w^{\max} 为风电场输出有功为 P_w 时对应的最大感性无功需求。

[0076] 所述步骤四的具体步骤为：

[0077] (1) 置风电机组、线路、变压器参数，置接入系统网络、元件参数；

[0078] (2) 置粒子群维数 K_{PSO} ，最大迭代数 N_{PSOMAX} ，计算精度 σ_{PSO} ，置潮流计算最大迭代次数 N_{PFMAX} ，潮流计算精度 σ_{PF} ；

- [0079] (3) 置 P_w 变化范围并赋初始值, 计算对应 P_w 条件下的 Q_s 边界条件;
- [0080] (4) 初始化粒子群的位置与速度, 即给定当次计算下的 Q_s 值;
- [0081] (5) 接入系统潮流计算初始化;
- [0082] (6) 代入 P_w 与 Q_s 计算包含风电场的接入系统潮流分布情况;
- [0083] (7) 若迭代收敛或迭代次数大于 N_{PFMAX} , 则保留潮流计算结果, 继续计算, 否则更新初值, 返回步骤(4);
- [0084] (8) 按式(10)所示计算所求粒子适应度值;
- [0085] (9) 将每个粒子适应度值与其个体极值进行比较, 如较优则更新当前个体极值 P_{id} ;
- [0086] (10) 将每个粒子适应度值与全局极值进行比较, 如较优则更新当前全局极值 P_{gd} ;
- [0087] (11) 根据式(18)~(19)更新每个粒子的位置与速度, 依据式(5)更新当前边界条件, 并校验更新后粒子是否满足约束条件要求, 如不满足, 重新生成粒子速度、更新位置, 直至满足约束条件, 若重复次数超过定值则以原可行粒子代替;

$$[0088] \quad v_{id}^{j+1} = \omega_{id}^j + c_1 \zeta (p_{id}^j - x_{id}^j) + c_2 \eta (p_{gd}^j - x_{id}^j) \quad (18)$$

$$[0089] \quad x_{id}^{j+1} = x_{id}^j + g v_{id}^{j+1} \quad (19)$$

[0090] 式中: l 为当前循环次数, c_1 、 c_2 为粒子权重系数; ω 为惯性权重; ζ 、 η 为 $[0, 1]$ 内均匀分布随机数; x_{id} 、 v_{id} 为第 i 维粒子的位置与速度; g 为约束因子;

[0091] (12) 判断当前迭代次数与误差值是否满足要求, 不满足则更新 P_w 值, 返回步骤(3), 否则终止粒子寻优计算, 并输出计算结果

[0092] 本发明的有益效果:

[0093] (1) 提出一种风功率分布规律分析方法, 并以年度周期为例, 进行风功率分布规律分析, 使所得分析规律可充分包含影响风功率波动规律的客观因素。

[0094] (2) 分析 DFIG 功率特性, 并探讨了 DFIG 的功率解耦问题, 指出解耦控制中的不足, 以及当前研究中对该问题考虑的欠缺。

[0095] (3) 首次给出可充分考虑 DFIG 无功调节特性的风电场的无功功率调节范围, 并将其应用于潮流计算之中。

[0096] (4) 针对 DFIG 及其所构成风电场的无功调节特性中存在的不足, 引入 STATCOM 作为风电场无功补偿设备, 并优化计算其容量。

[0097] (5) 以补偿的投资成本与运行成本最小化为优化目标, 以思想为指导, 建立无功补偿容量的优化决策模型。

[0098] (6) 在投资成本中充分考虑了风功率分布特性与 DFIG 的功率特性影响, 使所述优化计算方法具有更佳的经济与针对性。

[0099] (7) 优化计算中考虑了节点功率平衡约束、机组输出功率约束、输电元件功率约束、节点电压水平约束、负荷波动水平约束、风电场无功功率各项约束。

[0100] (8) 通过改进粒子群算法与潮流分析相结合, 实现对所建优化模型的求解, 具有较高的计算精度与速度, 并能有效克服动态边界问题, 所得结论亦验证了理论分析的有效性。

附图说明

- [0101] 图 1 为计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化方法流程图；
- [0102] 图 2 为美国东部 Michigan 地区 4638# 风电基地典型风功率概率分布特性曲线；
- [0103] 图 3 为美国东部 Michigan 地区 4638# 风电基地仿真系统接线示意图；
- [0104] 图 4 为美国东部 Michigan 地区 4638# 风电基地系统风功率分布特性曲线；
- [0105] 图 5 为美国东部 Michigan 地区 4638# 风电基地各补偿状态下风电场并网点电压水平变化曲线
- [0106] 图 6 为美国东部 Michigan 地区 4638# 风电基地各补偿状态下算例系统有功损耗变化曲线
- [0107] 图 7 为利用粒子群算法结合潮流计算程序进行优化计算流程图

具体实施方式

- [0108] 下面结合附图与实施例对本发明作进一步说明。
- [0109] 如图 1 所示，一种计及风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化方法，其工作步骤如下：
- [0110] 步骤一：开始；
- [0111] 步骤二：分为三个分支 A、B、C，这三个分支并发进行；
- [0112] 分支 A：采集风功率历史数据，对不同周期下风功率分布规律进行分析；
- [0113] 分支 B：采集无功补偿设备性能参数；
- [0114] 分支 C：采集 DFIG 性能参数，对 DFIG 的 P-Q 解耦进行特性分析，进行风电场节点在潮流计算中的处理；
- [0115] 步骤三：利用无功补偿容量优化模型进行优化处理，优化的目标为：无功补偿的投资成本、因无功率引起的风电系统运行成本均达到最小化；进行运行成本和投资成本的计算；其中运行成本中包含了风功率分布结果和功率特性的影响；
- [0116] 步骤四：利用粒子群算法结合潮流计算程序进行优化计算。
- [0117] 本文以美国东部各州 7000 余个高度为 80m 处的实测风速及其估算功率为基础数据^[16]，依据式(2)分析计算不同地区的概率分布函数，经对比分析，可将各地区风功率分布规律总结如图 2 所示三种典型分布形式。
- [0118] 如图 2 所示，I 型分布函数为 New York 地区，分布密度随有功功率由低至高呈“先高后低”态势，II 型为 Rhode Island 地区，与 I 型相反，呈“先低后高”态势；III 型为 Montane 地区，分布密度随有功功率由低至高呈“依次递减”态势。可以看出，同一地区的每年及平均概率分布函数具有明显相似性，体现了时间范畴下的趋势性规律；而各地区间分布特性差异显著，体现了空间范畴下的区域性差异。
- [0119] 分析额定功率及其附近的概率分布特征，并结合 DFIG 特性，可知 I、II 型风电场的无功调节问题最为突出，需配置较高的无功补偿容量；III 型风电场则可考虑充分利用 DFIG 感性无功调节能力，此时可配置较低的补偿容量。
- [0120] 依据上述分析特点进行补偿容量优化配置，将在保证无功电压调节持续性的同时，使补偿更有针对性，实现经济性。
- [0121] 本文以美国东部 Michigan 地区 4638# 风电基地的测风及其功率估算数据为基础，

以 IEEE14 节点系统标准数据为接入系统原型构建仿真测试系统,并以此对上文所提补偿容量优化方法的正确性与有效性进行计算分析。系统参数见表 2 所示,所建系统接线示意图如图 3 所示。

[0122] 算例系统中,风电场经接入线路接于 14 节点,补偿设备安装于 15 节点,即风电场集中母线处。该接入系统详细参数见表 2 所示。

[0123] 应用式(1)与式(2)统计风电场 2004 至 2006 年的年周期下风速、风功率及其年平均功率分布规律如图 4 所示。

[0124] 如图 4 所示,该风电场功率分布特性接近于图 2 中的 2 型曲线,满发及接近满发时间数较小,但在 0.9pu 左右时发电小时数存在一个高峰。与之对应的该风电场 P-Q 取值范围数据见表 3 所示。

[0125] 以标幺值进行优化计算,忽略补偿容量对安装成本的影响,相关参数选取见表 4 所示。将上述风电场年平均功率分布特性代入图 3 所示接入系统,依据式(10)~式(16)按解算步骤进行优化计算,所得计算结果如表 1 所示。

[0126] 表 1 算例系统优化计算结果

	Q_s	$\min F$	$P_{w.opt}$
[0127]	0.160 pu	0.6704 pu	0.8998 pu
	0.183 pu	0.5890 pu	0.9194 pu
	0.220 pu	0.7488 pu	0.9968 pu

[0128] 表 1 中,0.183pu 为对应最优补偿容量值,需损失 0.9124pu 以上有功出力区间。依据计算结果,弃风区间在最后一个出力高峰的末端,即图 4 中 ab 线右侧与分布曲线包围区域,其损失的有功功率较为有限,但所节省的补偿投入却是显著的。按 0.22pu(完全补偿),0.183pu(最经济补偿)及 0(无补偿)三种典型状态分析接入系统网损变化及风电场并网电压变化情况如图 4、图 5 所示。

[0129] 如图 4、5 所示,最优补偿在电压水平及损耗方面弱于完全补偿,但差值相对较小,可完全满足运行要求规范。

[0130] 经上述分析,补偿容量的优化决策方法可在充分保证风电系统无功功率调节连续性的前提下,可风电场的无功补偿具有最好的经济性与最强的针对性。

[0131] 表 2 算例系统结构参数表

首节点	末节点	支路类型	支路电阻	支路电抗	支路导纳 /2	额定电流	
1	2	0	0.01938	0.05917	0.02640	3.42	
2	3	0	0.04699	0.19797	0.02190	1.71	
2	4	0	0.05811	0.17632	0.01870	1.71	
1	5	0	0.05403	0.22304	0.02460	1.71	
2	5	0	0.05695	0.17388	0.01700	1.71	
3	4	0	0.06701	0.17103	0.01730	1.71	
4	5	0	0.01335	0.04211	0.00640	1.71	
7	8	0	0.0	0.17615	0.0	0.50	
7	9	0	0.0	0.11001	0.0	0.50	
[0132]	9	10	0	0.03181	0.08450	0.0	0.50
6	11	0	0.09498	0.19890	0.0	0.50	
6	12	0	0.12291	0.15581	0.0	0.50	
6	13	0	0.06615	0.13027	0.0	0.50	
9	14	0	0.12711	0.27038	0.0	0.50	
10	11	0	0.08205	0.19207	0.0	0.50	
12	13	0	0.22092	0.19988	0.0	0.50	
13	14	0	0.17093	0.34802	0.0	0.50	
4	7	1	0.0	0.20912	0.978	0.50	
4	9	1	0.0	0.55618	0.969	0.50	
5	6	1	0.0	0.25202	0.932	0.50	
14	15	1	0.2300	0.87000	0.950	0.50	

[0133] 注：选 14 节点为风电场公共联结点；15 节点为风电场并网点，线路 14~15 距离较远。

[0134] 表 3 算例系统风电场 P-Q 取值范围 (pu)

P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
0	-1.18~	0.2	-1.11~	0.4	-0.98~	0.6	-0.75~	0.8	-0.48~
05	0.76	5	0.69	5	0.56	5	0.33	5	0.06
0	-1.17~	0.3	-1.08~	0.5	-0.93~	0.7	-0.69~	0.9	-0.40~
[0135]	10	0	0.66	0	0.51	0	0.27	0	0.02
0	-1.16~	0.3	-1.05~	0.5	-0.87~	0.7	-0.63~	0.9	-0.31~
15	0.74	5	0.63	5	0.45	5	0.21	5	0.11
0	-1.14~	0.4	-1.02~	0.6	-0.81~	0.8	-0.56~	1.0	-0.22~
20	0.72	0	0.60	0	0.39	0	0.14	0	0.21

[0136] 附表 3 优化计算参数取值表

名称	参数	名称	参数
ρ_p	1	ρ_q	1.5
k_R	0.5	k_I	0.5
β_1	0.98	β_2	0.98
B_3	0.95	β_4	0.98

[0137] 注：容量价格参数目前难以找到精确值，

[0139] 本发明取有功无功两者相对值,不影响分析结论的正确性

[0140] 如图 7 所示,所述利用粒子群算法结合潮流计算程序进行优化计算的具体步骤为:

[0141] (1) 置风电机组、线路、变压器参数,置接入系统网络、元件参数;

[0142] (2) 置粒子群维数 K_{PSO} ,最大迭代数 N_{PSOMAX} ,计算精度 σ_{PSO} ,置潮流计算最大迭代次数 N_{PFMAX} ,潮流计算精度 σ_{PF} ;

[0143] (3) 置 P_w 变化范围并赋初始值,计算对应 P_w 条件下的 Q_s 边界条件;

[0144] (4) 初始化粒子群的位置与速度,即给定当次计算下的 Q_s 值;

[0145] (5) 接入系统潮流计算初始化;

[0146] (6) 代入 P_w 与 Q_s 计算包含风电场的接入系统潮流分布情况;

[0147] (7) 若迭代收敛或迭代次数大于 N_{PFMAX} ,则保留潮流计算结果,继续计算,否则更新初值,返回步骤(4);

[0148] (8) 按式(10)所示计算所求粒子适应度值;

[0149] (9) 将每个粒子适应度值与其个体极值进行比较,如较优则更新当前个体极值 P_{id} ;

[0150] (10) 将每个粒子适应度值与全局极值进行比较,如较优则更新当前全局极值 P_{gd} ;

[0151] (11) 根据式(18)~(19)更新每个粒子的位置与速度,依据式(5)更新当前边界条件,并校验更新后粒子是否满足约束条件要求,如不满足,重新生成粒子速度、更新位置,直至满足约束条件,若重复次数超过定值则以原可行粒子代替;

$$[0152] \quad v_{id}^{j+1} = \omega v_{id}^j + c_1 \zeta (p_{id}^j - x_{id}^j) + c_2 \eta (p_{gd}^j - x_{id}^j) \quad (18)$$

$$[0153] \quad x_{id}^{j+1} = x_{id}^j + g v_{id}^{j+1} \quad (19)$$

[0154] 式中: l 为当前循环次数, c_1 、 c_2 为粒子权重系数; ω 为惯性权重; ζ 、 η 为 $[0,1]$ 内均匀分布随机数; x_{id} 、 v_{id} 为第 i 维粒子的位置与速度; g 为约束因子;

[0155] (12) 判断当前迭代次数与误差值是否满足要求,不满足则更新 P_w 值,返回步骤(3),否则终止粒子寻优计算,并输出计算结果

[0156] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

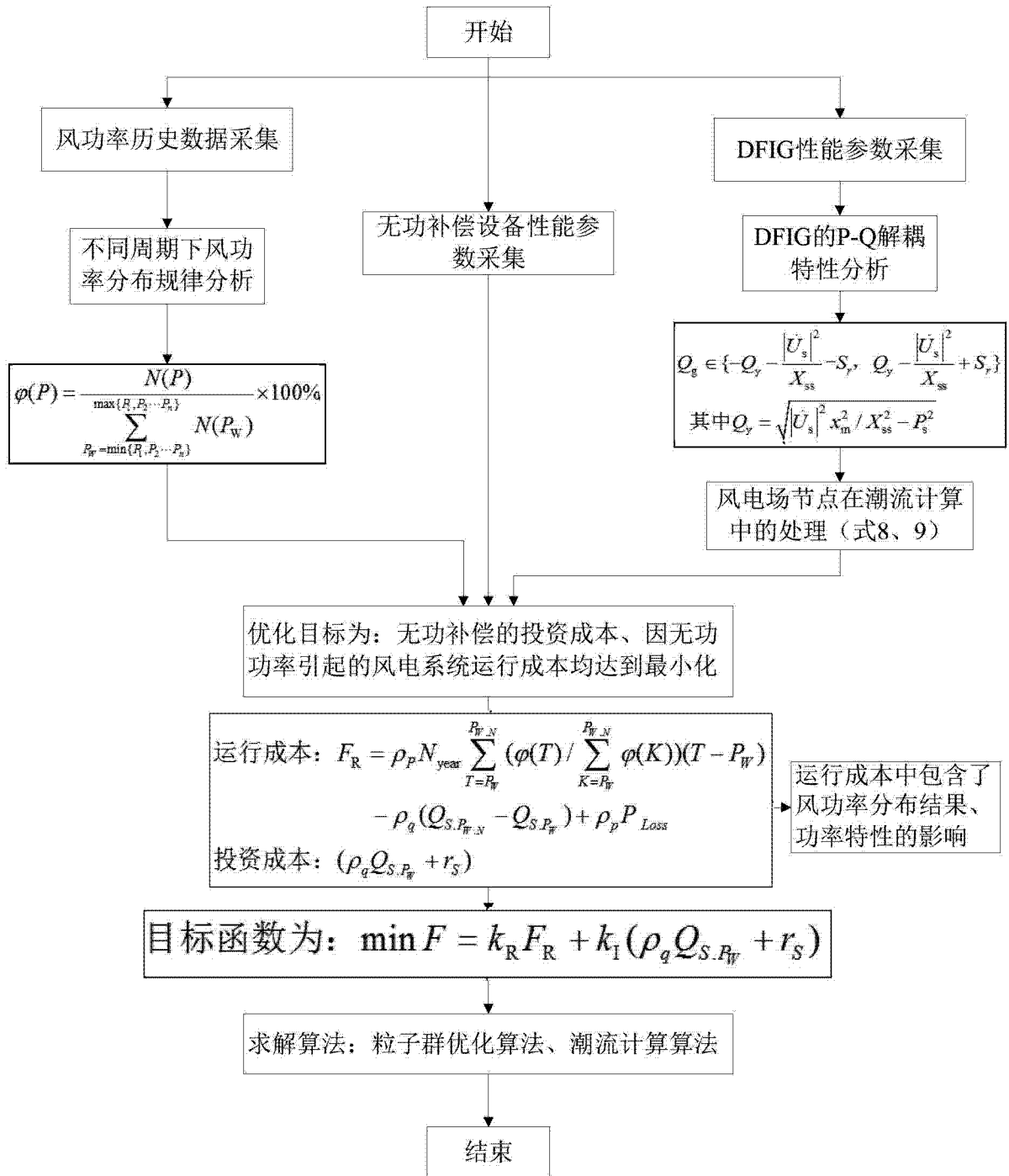


图 1

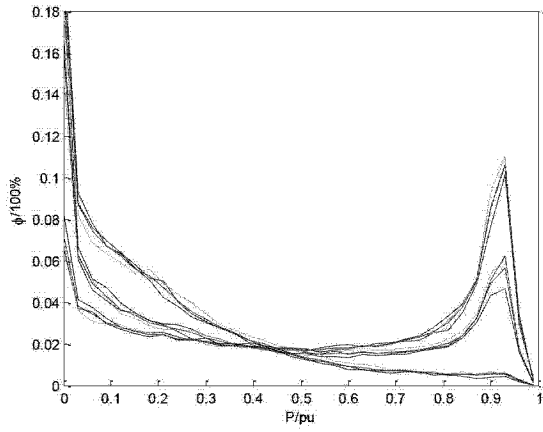


图 2

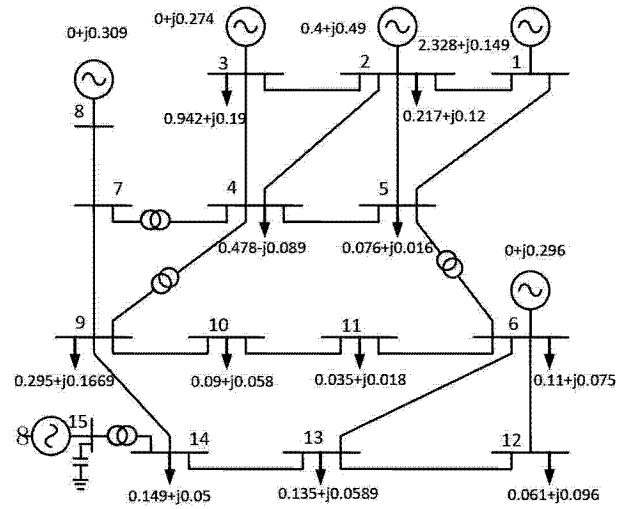


图 3

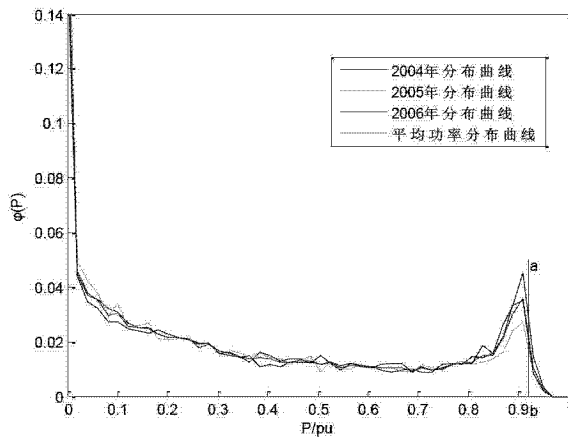


图 4

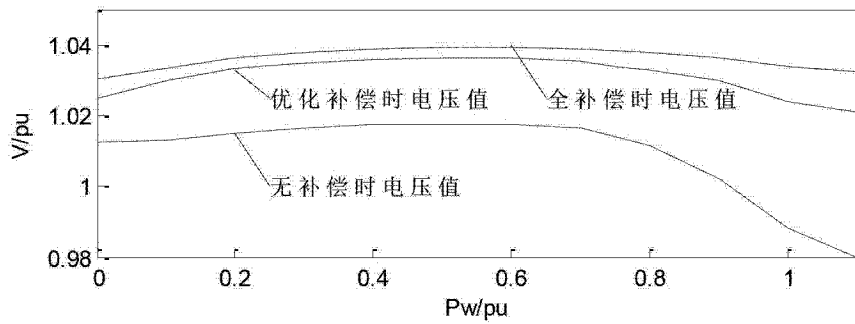


图 5

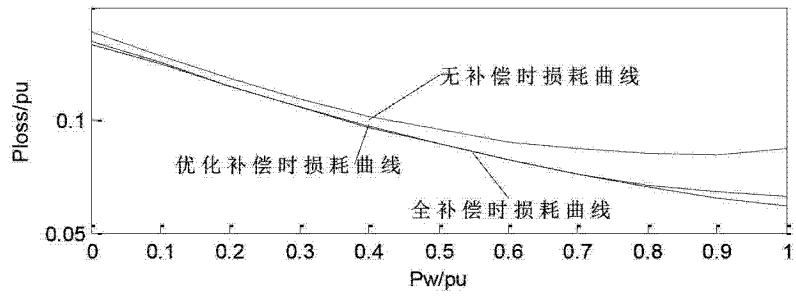


图 6

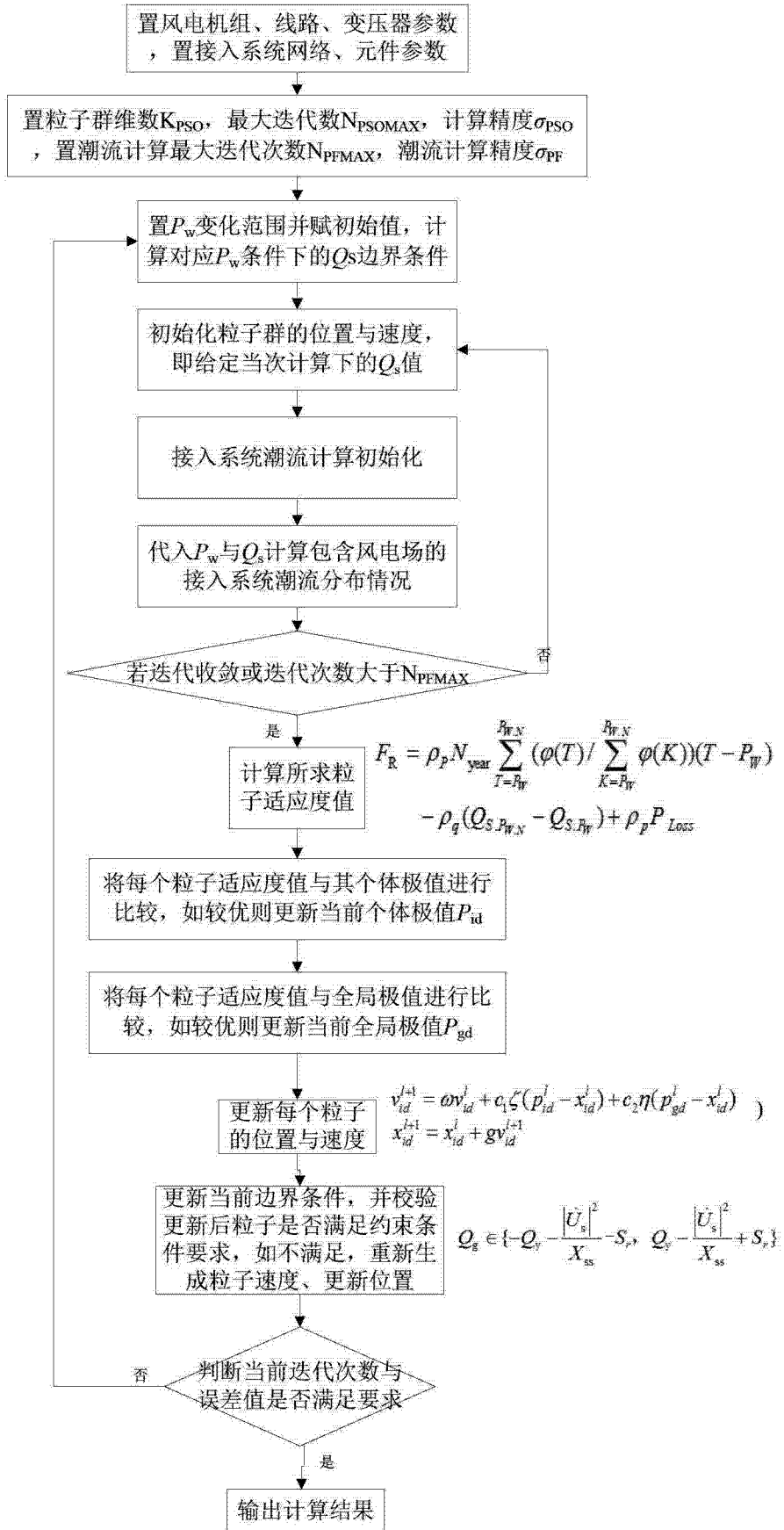


图 7