



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105281371 A

(43) 申请公布日 2016. 01. 27

(21) 申请号 201510386736. 1

(22) 申请日 2015. 07. 03

(71) 申请人 长沙理工大学

地址 410004 湖南省长沙市万家丽南路 2 段  
960 号

(72) 发明人 马瑞 李默

(51) Int. Cl.

H02J 3/46(2006. 01)

权利要求书3页 说明书6页 附图1页

### (54) 发明名称

一种考虑风力发电的可伸缩有功静态安全域

### (57) 摘要

本发明考虑了含风电场的可伸缩有功静态安全域的求解方法,包括以下步骤:1)、风电场的有功功率出力的建模;2)、含风电场的电力系统有功静态安全域目标函数的建立;3)、系统的安全约束建立;4)、含风电场的电力系统有功安全域的模型求解,得到考虑风电出力随机性在不同置信度水平下的系统的可伸缩有功静态安全域。本发明针对电力系统中风电机组有功出力随机波动情形下,研究了其对系统有功静态安全稳定域的影响,并对系统在每种运行状态下的安全域进行了求解,得到了系统所有运行状态下的最大安全域,其特征是随机的风电出力在不同置信度水平下的一个可伸缩的安全域。

1. 一种考虑风力发电的可伸缩有功静态安全域,其包括以下步骤:

(1) 依据风速与风力发电机输出的有功功率关系,结合风速的概率密度函数,建立风电场有功输出概率密度函数

(2) 考虑风力发电的不可控性特点,设置以发电机可调机组的可调有功容量作为系统有功静态安全域的目标函数

(3) 考虑系统直流潮流模型下的潮流约束、发电机功率可调机组的安全约束、相邻节点相角差约束以及线路安全约束

(4) 含风电场的电力系统有功安全域模型求解,在风电有功随机注入在某一置信度下,用直流潮流求得系统运行状态后采用线性优化方法对该运行状态的静态安全域目标函数进行优化求解,得到某一确定的安全域,然后再改变潮流运行状态,求取所有运行状态静态安全域,并得到最大静态安全域,改变风电有功随机注入的置信度,得到可伸缩的有功静态电压安全域。

2. 根据权利要求 1 所述的风速与风力发电输出有功功率关系,其特征在于,选取二参数的 weibull 分布对风速  $v$  不确定性变化规律的描述,其概率密度函数为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (v \geq 0)$$

式中: $k$ 、 $c$  分别为形状参数和尺度参数,

单台风电机组有功功率出力与风电场风速的关系可描述为:

$$P_m = \begin{cases} 0, & v < v_{cut-in}, v > v_{cut-out} \\ 0.5\rho AC_p v^3, & v_{cut-in} \leq v < v_{rated} \\ P_{rated}, & v_{rated} \leq v < v_{cut-out} \end{cases}$$

式中, $v_{cut-in}$ ,  $v_{cut-out}$ ,  $v_{rated}$  分别为风电机组的切入、切出和额定风速,  $\rho$  为空气密度,  $A$  为风轮所覆盖的面积,  $C_p$  为该风力机的风能利用系数,  $P_{rated}$  为机组的有功功率额定值,暂不考虑风力发电功率的损失与风电场的尾流效应、低电压穿越和风电机组的强迫停机率等因素时,可认为风电注入系统的有功出力为风电场中所有风力机的有功出力之和,即为:

$$P_{FG} = NP_m = \begin{cases} 0, & v < v_{cut-in}, v > v_{cut-out} \\ 0.5N\rho AC_p v^3, & v_{cut-in} \leq v < v_{rated} \\ NP_{rated}, & v_{rated} \leq v < v_{cut-out} \end{cases}$$

式中,  $N$  为风电场中的风电机组台数,

经统计,在绝大部分时间内风速都维持在  $v_{cut-in}$  和  $v_{rated}$  间,结合风速的概率密度函数,可得风电场有功出力的概率密度函数为:

$$\widetilde{P}_{FG} = f(P_{FG}) = \frac{k}{(0.5N\rho c AC_p)^{1/3}} \left(\frac{P_{FG}}{0.5N\rho c AC_p}\right)^{\frac{k-1}{3}} \exp\left[-\left(\frac{P_{FG}}{0.5N\rho c AC_p}\right)^{\frac{k}{3}}\right].$$

3. 根据权利要求 1 所述的系统有功静态安全域的目标函数,其特征在于,考虑风电场出力不可控制的特点,对于含风电场的电力系统只能对其常规可调机组有功出力进行调

节,系统的有功静态安全域以可调机组总容量作为目标函数:

$$\text{Max } Z = \sum_{i \in \text{NG-FG-1}} \omega_i \cdot (P_i^M - P_i^m)$$

式中,  $\omega_i$  为第  $i$  台发电机功率可调机组的权重系数,其体现对某一机组调节量的偏爱程度,NG 为系统发电机节点集合,FG 为风电机组与系统节点相连的节点集合,NG-FG-1 为除平衡机与风电机组外的发电机节点的节点集合,  $P_i^M$ - $P_i^m$  为第  $i$  台常规可调机组的安全有功可调范围。

4. 根据权利要求 1 所述考虑系统直流潮流模型下的潮流约束、发电机功率可调机组的安全约束、相邻节点相角差约束以及线路安全约束,其特征是,对于除风力发电机组与平衡机外的发电机有

直流潮流模型为:

$$[P^k] = [B] \cdot [\theta^k]$$

对于除风力发电机组与平衡机外的发电机有:

$$P_{Gi}^k \geq P_i^m \geq \underline{P}_{Gi}$$

$$P_{Gi}^k \leq P_i^M \leq \overline{P}_{Gi}$$

式中,  $[P^k]$  为满足第  $k$  次潮流计算的节点有功注入矢量,  $[\theta^k]$  为满足第  $k$  次潮流计算的节点电压相角矢量,  $[B]$  为直流潮流电纳矩阵(这里假定系统网络结构与线路参数不随负载情况而改变),  $P_{Gi}^k$  为满足第  $k$  次潮流计算的常规可调机组  $i$  的基本运行点,  $P_i^M$ ,  $P_i^m$  分别为第  $i$  台机组在显示静态安全域的上、下边界,  $\overline{P}_{Gi}$ ,  $\underline{P}_{Gi}$  分别为第  $i$  台机组的功率上、下限,  $[\widetilde{P}_{FG}]$  为风电随机有功出力矢量,  $\overline{P}_N$ ,  $\underline{P}_N$  分别为松弛节点的功率上、下限, ND 为已知负荷节点集合,  $\Sigma P_i^k$  为满足第  $k$  次潮流计算的负荷节点注入功率之和。

节点相角约束为:

$$[\phi_{i\min}] \leq [\phi_i] \leq [\phi_{i\max}]$$

式中,  $[\phi_{i\min}]$ 、 $[\phi_i]$ 、 $[\phi_{i\max}]$  分别为第  $i$  条支路两端节点允许的最小相角差、第  $i$  条支路两端节点实际相角差、第  $i$  条支路两端节点允许的最大相角差,

线路安全约束方程可表示为:

$$[D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \leq [\overline{P}_L] - [D_D] \cdot [P_D] - [D_{FG}] \cdot [\widetilde{P}_{FG}]$$

$$[D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \geq [\underline{P}_L] - [D_D] \cdot [P_D] - [D_{FG}] \cdot [\widetilde{P}_{FG}]$$

式中,  $[P_{NG}]$ 、 $[\widetilde{P}_{FG}]$  和  $[P_D]$  分别与常规可调发电机节点、风电机组节点和负荷节点相关的矩阵,矩阵  $[D_{NG}]$ 、 $[D_{FG}]$  和  $[D_D]$  也类似,  $[\overline{P}_L]$ 、 $[\underline{P}_L]$  分别为线路有功矢量的上、下限;  $[P_D]$  为负荷矢量。

5. 根据权利要求 1 至 4 所述,对含风电场的电力系统有功安全域模型求解,其特征在

于,通过对风机有功随机出力 $\widetilde{P}_{FG}$ 通过置信区间的描述后,得到:

$$\left[ \underline{P}_{FG} - z_{\frac{\delta}{2}}, \overline{P}_{FG} + z_{\frac{\delta}{2}} \right]$$

式中, $\overline{P}_{FG}$ 为风机有功随机出力的期望值; $z_{\frac{\delta}{2}}$ 、 $\overline{z_{\frac{\delta}{2}}}$ 分别为风机有功随机出力的下分位数和上分位数,其置信度为 $1-\delta$ ,由区间数的运算法则得

$$- \sum_{i \in NG-FG-1} P_i^m \leq \overline{P}_N + \sum_{i \in ND} P_i + \underline{b}$$

$$- \sum_{i \in NG-FG-1} P_i^M \geq \underline{P}_N + \sum_{i \in ND} P_i + \overline{b}$$

$$[D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \leq [P_L] - [D_D] \cdot [P_D] - \overline{d}_F$$

$$[D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \geq [P_L] - [D_D] \cdot [P_D] - \underline{d}_F$$

式中,

$$[\underline{b}, \overline{b}] = \left[ \sum_{i \in FG} \left( P_{FG} - z_{\frac{\delta}{2}} \right), \sum_{i \in FG} \left( P_{FG} + z_{\frac{\delta}{2}} \right) \right]$$

$$[\underline{d}_F, \overline{d}_F] = [D_{FG}] \left[ \sum_{i \in FG} \left( P_{FG} - z_{\frac{\delta}{2}} \right), \sum_{i \in FG} \left( P_{FG} + z_{\frac{\delta}{2}} \right) \right]$$

先给定系统的某一运行状态的条件,由直流潮流方程计算得出潮流方程的解,通过线性优化法对目标函数及约束进行优化,得到在该运行条件下系统的安全域,并与上一次潮流方程解下的安全域比较,分别取最大、最小安全域作为系统的安全域,判断相邻两次目标函数值差值是否小于设定值,若是,计算结束,若不是,则继续判断是否达到迭代上限,若达到,则计算结束,否则修正运行条件进入下一次潮流计算,重复以上步骤,最后得到系统的安全域能使风电有功随机出力在 $(1-\delta)$ 置信区间内的取值都是安全的,当 $\delta$ 取值不同,考虑风电场有功出力的随机性在不同置信度下所得到的系统有功静态安全域将会伸缩。

## 一种考虑风力发电的可伸缩有功静态安全域

### 技术领域

[0001] 本发明属于电力系统安全稳定运行领域,涉及电力系统风电注入的随机性形成一种可伸缩的有功静态安全域。

### 背景技术

[0002] 当前风力发电相关技术的研究日益成熟,电力系统中风电装机容量总量的不断攀升,而风电出力的随机性对电网的影响也日趋明显,在考虑风电随机出力对电网静态安全的影响,对维持电力系统的安全稳定及提高对风电的利用十分重要。

[0003] 现有对有功静态安全域的研究一般从负荷的不确定性角度来考虑,《基于随机负荷与模糊线性规划的可伸缩静态安全域》在采用传统的边界扩展法与线性规划法求解静态安全域的基础上,考虑负荷随机性与线路潮流约束条件的模糊性,提出模糊线性规划法求解安全域;有学者考虑了风电随机不确定性注入的系统静态安全研究却不是从安全域角度深入的,文献《基于随机潮流的含风电电力系统静态安全评估》从概率和风险两个角度快速实现系统的安全的综合量化评价;文献《考虑风电场出力随机性的电网静态安全风析》综合考虑了风电场出力随机性、常规机组强迫停运、负荷预测不确定性等因素,运用灵敏度分析理论和随机潮流计算方法,提出一种适用于含风电电网规划的静态安全快速分析的概率方法,对风电随机注入的电力系统静态安全域的特征尚未研究。

[0004] 为了能更好地将电力系统的特点与发展清洁可再生能源的理念相结合,研究含风电随机有功注入的电力系统静态安全域的特征,可以作为调度人员充分利用风电资源又保证系统运行安全的重要参考,对逐步提高系统风电的利用率有着重要意义。

### 发明内容

[0005] 风力发电的随机性、间歇性和不可控性对传统确定系统的安全稳定运行会产生较大影响,有必要对含风电机组的电力系统的安全域进行研究分析。有功静态安全域有全域和响应域两种形式,本发明专利从系统有功功率的角度,对含风电机组的电力系统静态安全域的响应域特征进行了研究。对风电场有功出力的随机性进行建模得到有功出力的概率密度函数,以除平衡机组外的系统发电机功率可调机组的有功功率总容量作为系统静态安全域的目标函数,遵循系统直流潮流模型下的潮流约束、发电机功率可调机组的安全约束、相邻节点相角差约束以及线路安全约束,并在已知负荷大小情况下采用线性优化方法对在风电有功随机注入的某一置信区间对目标函数优化求解,得到随机风电有功出力在该置信区间下的系统静态安全域。改变置信区间的大小,得到不同的静态安全域,从而得到系统有风电注入的可伸缩的有功静态安全域。

[0006] 为实现上述目的,本发明采取以下技术方案:

[0007] 本发明解决上述问题采取的技术方案:

[0008] 1、风电场的有功功率出力建模。依据风速与风力发电机输出的有功功率关系,结合风速的概率密度函数,建立风电场有功输出概率密度函数;

[0009] 2、含风电场的电力系统有功静态安全域的目标函数。考虑到风力发电的不可控性特点,以发电机可调机组的可调有功容量作为系统有功静态安全域的目标函数;

[0010] 3、系统的安全约束。考虑了系统的直流潮流模型下的潮流约束、发电机功率可调机组的安全约束、相邻节点相角差约束以及线路安全约束;

[0011] 4、含风电场的电力系统有功安全域的模型求解。在风电有功随机注入在某一置信度下,通过求取某一状态下的直流潮流,采用线性优化方法对该运行状态的静态安全域目标函数进行优化求解,得到某一确定的安全域;调整控制变量,求解系统在下一运行状态下的静态安全域;直至得到系统所有运行情况下的安全域,并得到最大静态安全域;改变风电有功随机注入的置信度,得到含风电系统所有稳定运行状态下可伸缩的有功静态电压安全域;

[0012] 本发明主要针对含有风电机组的电力系统有功静态安全域特征进行研究。根据风电随机注入在不同置信度下,求得的可伸缩有功静态安全域,供调度人员作为参考,以在满足系统安全的前提下提高对风电的利用率。

#### 附图说明

[0013] 图 1 是本发明模型求解总体流程图(求解安全域的流程图)。

#### 具体实施方式

[0014] 本发明包括以下步骤:

[0015] 1、风电场的有功功率出力建模

[0016] 风力发电受风速、气温等自然环境条件影响,其发电出力表现出了随机不确定性特征。根据美国国家可再生能源实验室(NREL)测得的几个典型日的实测风速变化曲线数据可知,风速的变化没有明显的规律,但是几个典型日的风速大都集中在某一范围内,超出这个范围的情况非常少。

[0017] 虽然风力发电机的输出功率与桨距角、空气密度等有一定的关系,但其出力主要取决于风速的大小。目前,一般主要是依据 Rayleigh 分布和 Weibull 概率分布求取风电出力功率,或者直接采用风电功率的预测数据。根据 Weibull 分布可知,当风速小于切入风速  $v_{cut\ in}$  或大于切出风速  $v_{cut\ out}$  时,风力发电机的出力为 0;当风速在切入风速  $v_{cut\ in}$  与额定风速  $v_{rated}$  之间时,发电机的出力近似与风速成线性关系;当风速在额定风速  $v_{rated}$  与切出风速  $v_{cut\ out}$  之间时,发电机输出额定功率。因此,风力发电机的输出功率与风速的变化曲线一样,除少数时段外,主要集中在某一区间内。

[0018] 通过对大量实测风电出力数据的拟合表明,对于风速  $v$  不确定性变化规律的描述可选取二参数的 weibull 分布,其概率密度函数为:

$$[0019] \quad f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (v \geq 0) \quad (1)$$

[0020] 式中: $k$ 、 $c$  分别为形状参数和尺度参数;

[0021] 单台风电机组有功功率出力与风电场风速的关系可描述为:

$$[0022] \quad P_m = \begin{cases} 0, & v < v_{cut-in}, v > v_{cut-out} \\ 0.5\rho AC_p v^3, & v_{cut-in} \leq v < v_{rated} \\ P_{rated}, & v_{rated} \leq v < v_{cut-out} \end{cases} \quad (2)$$

[0023] 式中,  $v_{cut-in}$ ,  $v_{cut-out}$ ,  $v_{rated}$  分别为风电机组的切入、切出和额定风速;  $\rho$  为空气密度;  $A$  为风轮所覆盖的面积;  $C_p$  为该风力机的风能利用系数;  $P_{rated}$  为机组的有功功率额定值。

[0024] 暂不考虑风力发电功率的损失与风电场的尾流效应、低电压穿越和风电机组的强迫停机率等因素时, 可认为风电注入系统的有功出力为风电场中所有风力机的有功出力之和, 即为:

$$[0025] \quad P_{FG} = NP_m = \begin{cases} 0, & v < v_{cut-in}, v > v_{cut-out} \\ 0.5N\rho AC_p v^3, & v_{cut-in} \leq v < v_{rated} \\ NP_{rated}, & v_{rated} \leq v < v_{cut-out} \end{cases} \quad (3)$$

[0026] 式中,  $N$  为风电场中的风电机台数;

[0027] 经统计, 在绝大部分时间内风速都维持在  $v_{cut-in}$  和  $v_{rated}$  间, 结合风速的概率密度函数, 可得风电场有功出力的概率密度函数为:

[0028]

$$\widetilde{P}_{FG} = f(P_{FG}) = \frac{k}{(0.5N\rho cAC_p)^{1/3}} \left( \frac{P_{FG}}{0.5N\rho cAC_p} \right)^{\frac{k-1}{3}} \exp\left[-\left(\frac{P_{FG}}{0.5N\rho cAC_p}\right)^{\frac{k}{3}}\right] \quad (4)$$

[0029] 2、含风电场的电力系统有功静态安全域的目标函数

[0030] 由于风电场出力不可控制的特点, 对于含风电场的电力系统只能对其常规可调机组有功出力进行调节, 则系统的有功静态安全域以可调机组总容量作为目标函数:

$$[0031] \quad \text{Max} \quad Z = \sum_{i \in NG-FG-I} \omega_i \cdot (P_i^M - P_i^m) \quad (5)$$

[0032] 式中,  $\omega_i$  为第  $i$  台发电机功率可调机组的权重系数, 其体现对某一机组调节量的偏爱程度;  $NG$  为系统发电机节点集合;  $FG$  为风电机组与系统节点相连的节点集合;  $NG-FG-I$  为除平衡机与风电机外的发电机节点的节点集合;  $P_i^M - P_i^m$  为第  $i$  台常规可调机组的安全有功可调范围。

[0033] 3、系统的安全约束

[0034] 3.1、直流潮流约束

[0035] 直流潮流模型为:

$$[0036] \quad [P^k] = [B] \cdot [\theta^k] \quad (6)$$

[0037] 式中,  $[P^k]$  为满足第  $k$  次潮流计算的节点有功注入矢量;  $[\theta^k]$  为满足第  $k$  次潮流计算的节点电压相角矢量;  $[B]$  为直流潮流电纳矩阵 (这里假定系统网络结构与线路参数不随负载情况而改变)。此约束为等式约束。

[0038] 3.2、发电机组安全约束

[0039] 对于除风力发电机组与平衡机外的发电机有

$$[0040] \quad P_{Gi}^k \geq P_i^m \geq \underline{P}_{Gi} \quad (7)$$

$$[0041] \quad P_{Gi}^k \leq P_i^M \leq \overline{P}_{Gi} \quad (8)$$

[0042] 对于平衡机有

[0043]

$$-\left( \sum_{i \in ND} P_i^k + \sum_{i \in NG-FG-1} P_i^m + \sum_{i \in FG} \widetilde{P}_{FG} \right) \leq \overline{P}_N \quad (9)$$

[0044]

$$-\left( \sum_{i \in ND} P_i^k + \sum_{i \in NG-FG-1} P_i^M + \sum_{i \in FG} \widetilde{P}_{FG} \right) \geq \underline{P}_N \quad (10)$$

[0045] 式中,  $P_{Gi}^k$  为满足第 k 次潮流计算的常规可调机组 i 的基本运行点;  $P_i^M, P_i^m$  分别为第 i 台机组在显示静态安全域的上、下边界;  $\overline{P}_{Gi}, \underline{P}_{Gi}$  分别为第 i 台机组的功率上、下限;  $\widetilde{P}_{FG}$  为风电随机有功出力矢量;  $\overline{P}_N, \underline{P}_N$  分别为松弛节点的功率上、下限; ND 为已知负荷节点集合,  $\sum P_i^k$  为满足第 k 次潮流计算的负荷节点注入功率之和。此约束为不等约束。

[0046] 3.3、节点相角约束

[0047] 支路两端节点的相角差为:

$$[0048] \quad [\Phi] = [A] \cdot [\theta^k] \quad (11)$$

[0049] 式中, [A] 为节点支路关联矩阵;  $[\Phi]$  为支路两端节点的相角差;

[0050] 节点相角约束为:

$$[0051] \quad [\Phi_{i\min}] \leq [\Phi_i] \leq [\Phi_{i\max}] \quad (12)$$

[0052] 式中,  $[\Phi_{i\min}]$ 、 $[\Phi_i]$ 、 $[\Phi_{i\max}]$  分别为第 i 条支路两端节点允许的最小相角差、第 i 条支路两端节点实际相角差、第 i 条支路两端节点允许的最大相角差;

[0053] 3.4、线路安全约束

[0054] 支路潮流方程式为:

$$[0055] \quad [P_L] = [B_L] \cdot [\Phi] \quad (13)$$

[0056] 式中,  $[P_L]$  为线路的有功潮流矢量;  $[B_L]$  为支路导纳组成的对角阵, 为 L 阶方阵;

[0057] 由直流潮流模型可得线路有功潮流矢量表达式为:

$$[0058] \quad [P_L] = [B_L] \cdot [A] \cdot [B]^{-1} \cdot [P] = [D] \cdot [P] \quad (14)$$

[0059] 式中, 其中  $[D] = [B_L] \cdot [A] \cdot [B]^{-1}$ 。

[0060] 在式中, 将有功注入矢量 [P] 划分为常规可调发电机节点、风电机组节点和负荷节点相关联的矢量  $[P_{NG}]$ 、 $\widetilde{P}_{FG}$  和  $[P_D]$ , 相应地把矩阵 [D] 划分为子矩阵  $[D_{NG}]$ 、 $[D_{FG}]$  和  $[D_D]$ , 则线路安全约束方程可表示为:

[0061]



$$[D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \leq [\overline{P_L}] - [D_D] \cdot [P_D] - [D_{FG}] \cdot [\widetilde{P_{FG}}] \quad (15)$$

[0062]

$$[D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \geq [\underline{P_L}] - [D_D] \cdot [P_D] - [D_{FG}] \cdot [\widetilde{P_{FG}}] \quad (16)$$

[0063] 式中,  $[\overline{P_L}]$ 、 $[\underline{P_L}]$  分别为线路有功矢量的上、下限;  $[P_D]$  为负荷矢量; 此约束为不等约束。

[0064] 4、含风电场的电力系统有功安全域的模型求解

[0065] 在以上模型中, 风电机组有功出力为随机变量, 负荷大小为已知量。采用置信区间对风机有功出力这个随机变量进行描述, 使置信区间左右端点具有相同的概率, 即随机变量的置信区间关于随机变量的期望值对称。对风机有功随机出力  $\widetilde{P_{FG}}$  通过置信区间的描述后, 得到:

$$[0066] \quad \left[ \frac{P_{FG} - z_{\frac{\delta}{2}}}{2}, \frac{P_{FG} + z_{\frac{\delta}{2}}}{2} \right] \quad (17)$$

[0067] 式中,  $P_{FG}$  为风机有功随机出力的期望值;  $\frac{z_{\frac{\delta}{2}}}{2}$ 、 $\frac{z_{\frac{\delta}{2}}}{2}$  分别为风机有功随机出力的下分位数和上分位数, 其置信度为  $1-\delta$ 。

[0068] 把 (17) 式代入 (9)、(10)、(15) 和 (16) 式, 由区间数的运算法则得:

$$[0069] \quad - \sum_{i \in NG-FG-1} P_i^m \leq \overline{P_N} + \sum_{i \in ND} P_i + [\underline{b}, \overline{b}] \quad (18)$$

$$[0070] \quad - \sum_{i \in NG-FG-1} P_i^M \geq \underline{P_N} + \sum_{i \in ND} P_i + [\underline{b}, \overline{b}] \quad (19)$$

$$[0071] \quad [D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \leq [\overline{P_L}] - [D_D] \cdot [P_D] - [d_F, \overline{d_F}] \quad (20)$$

$$[0072] \quad [D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \geq [\underline{P_L}] - [D_D] \cdot [P_D] - [d_F, \overline{d_F}] \quad (21)$$

[0073] 式中,

$$[0074] \quad [\underline{b}, \overline{b}] = \left[ \sum_{i \in FG} \left( P_{FG} - z_{\frac{\delta}{2}} \right), \sum_{i \in FG} \left( P_{FG} + z_{\frac{\delta}{2}} \right) \right];$$

$$[0075] \quad [d_F, \overline{d_F}] = [D_{FG}] \left[ \sum_{i \in FG} \left( P_{FG} - z_{\frac{\delta}{2}} \right), \sum_{i \in FG} \left( P_{FG} + z_{\frac{\delta}{2}} \right) \right]。$$

[0076] 去掉约束 (18)、(19)、(20) 和 (21) 的中存在的冗余约束, 有:

$$[0077] \quad - \sum_{i \in NG-FG-1} P_i^m \leq \overline{P_N} + \sum_{i \in ND} P_i + \underline{b} \quad (22)$$

$$[0078] \quad - \sum_{i \in NG-FG-1} P_i^M \geq \underline{P}_N + \sum_{i \in ND} P_i + \bar{b} \quad (23)$$

$$[0079] \quad [D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \leq [\underline{P}_L] - [D_D] \cdot [P_D] - \bar{d}_F \quad (24)$$

$$[0080] \quad [D_{NG}] \cdot [P_{NG}] \geq [\underline{P}_L] - [D_D] \cdot [P_D] - \underline{d}_F \quad (25)$$

[0081] 先给定系统的某一运行状态的条件,由直流潮流方程计算得出潮流方程的解;然后通过线性优化法对目标函数(5)及约束(7)、(8)、(22)、(23)、(24)和(25)进行优化,得到在该运行条件下系统的安全域,并与上一次潮流方程解下的安全域比较,分别取最大、最小安全域作为系统的安全域,判断相邻两次目标函数值差值是否小于设定值,若是,计算结束;若不是,则继续判断是否达到迭代上限,若达到,则计算结束,否则修正运行条件进入下一次潮流计算,重复以上步骤。最后得到风电有功随机出力在 $(1-\delta)$ 置信区间内的系统所以运行状态下静态安全域。

[0082] 上述求出的安全域是在 $(1-\delta)$ 置信度下求得的。若 $\delta$ 确定,那么直观安全域也就确定。若 $\delta$ 减小,则置信度增大,那么直观安全域就会缩小;若 $\delta$ 增大,则置信度降低,那么直观安全域会扩大。此外,当 $\delta$ 取值不同,约束条件(22)、(23)、(24)和(25)将会伸缩。综上所述,含有风电场的电力系统,考虑风电场有功出力的随机性在不同置信度下所得到的系统有功静态安全域是可伸缩的。

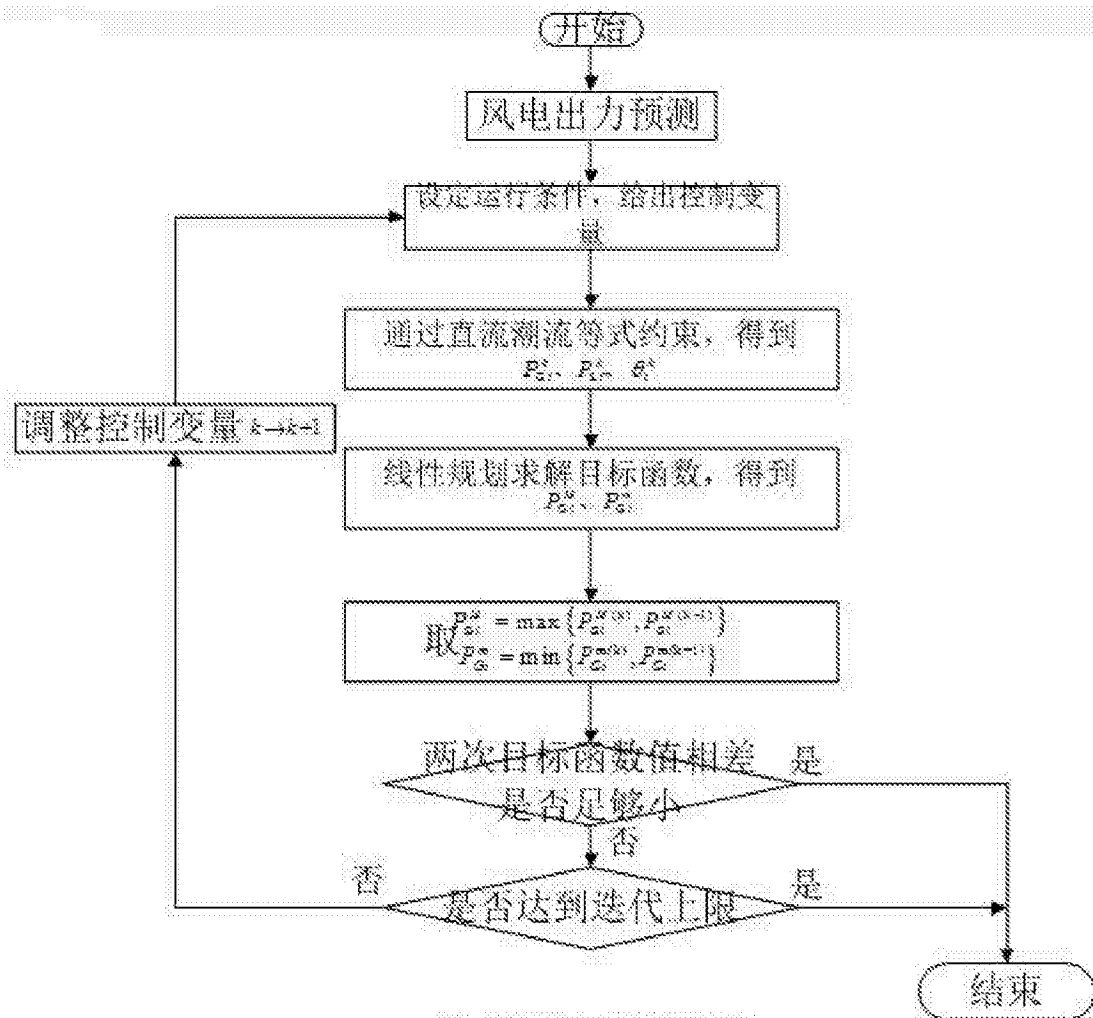


图1 模型求解总体流程图