



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112803473 A

(43) 申请公布日 2021.05.14

(21) 申请号 202011561272.0 *H02J 3/46* (2006.01)

(22) 申请日 2020.12.25 *H02J 3/36* (2006.01)

(71) 申请人 国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司 *H02J 3/06* (2006.01)

地址 314033 浙江省嘉兴市城北路99号 *H02J 3/48* (2006.01)

申请人 国网浙江省电力有限公司 *H02J 3/50* (2006.01)

浙江大学

(72) 发明人 项中明 殷伟斌 吴一峰 徐立中
张思 陶欢 杨晓雷 丁磊明
唐律 李洋 梁梓杨 丁一

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务有限公司 33200

代理人 林超

(51) Int. Cl.
H02J 3/38 (2006.01)

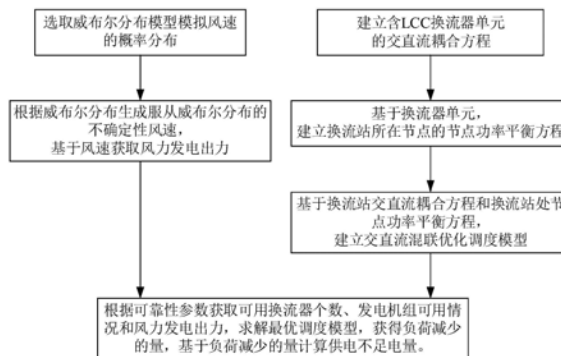
权利要求书4页 说明书10页 附图3页

(54) 发明名称

风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法

(57) 摘要

本发明公开了一种风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法。包括以下步骤：利用威布尔分布模型模拟风速的累计概率分布；对风速的累计概率分布进行处理得到获得模拟风速，获得风力发电出力；获得含换流器的交直流耦合方程；确定换流器所在节点的节点功率平衡模型；利用含换流器的交直流耦合方程和换流器所在节点的节点功率平衡模型，建立最优调度模型；最优调度模型根据风力发电出力、可用换流器数量和发电机组可用情况进行模型求解获得负荷减少的量，由负荷减少的量计算供电不足电量，根据供电不足电量进行提高电力系统的可靠性。本发明有效对特高压直流和风电接入的电力系统进行可靠性分析，采取有效的措施保证电力系统的可靠运行。



1. 风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法,其特征在于,包括步骤如下:

步骤1:利用威布尔分布模型模拟风速的累计概率分布;

步骤2:对风速的累计概率分布进行处理得到获得模拟风速,通过风力发电出力与模拟风速的关系对模拟风速进行计算获得风力发电出力,实现风力发电出力的不确定性模拟;

步骤3:根据电力系统的换流站中换流器的准稳态模型,获得含换流器的交直流耦合方程;

步骤4:根据电力系统的交直流潮流方程获取换流器数量和功率的关系,获得各自换流器所在节点的功率平衡方程,确定换流器所在节点的节点功率平衡模型;

步骤5:利用含换流器的交直流耦合方程和换流器所在节点的节点功率平衡模型,建立最优调度模型;

步骤6:根据电力系统的可靠性参数确定可用换流器个数和发电机组的可用情况,同时获取风力发电出力,然后将可用换流器个数、发电机组的可用情况和风力发电出力输入最优调度模型,最优调度模型根据上述数据进行模型求解,获得负荷减少的量,并由负荷减少的量计算供电不足电量,最后根据供电不足电量进行提高电力系统的可靠性。

2. 根据权利要求1所述的风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法,其特征在于:所述步骤1具体为:

威布尔分布模型模拟风速的累计概率分布,公式如下:

$$y = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

式中, v 为模拟风速, c 为尺度参数, k 为形状参数, y 表示出现模拟风速 v 时对应的概率, y 满足 $0 \leq y \leq 1$ 。

3. 根据权利要求1所述的风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法,其特征在于:所述步骤2具体为:

将风速的累计概率分布进行处理得到威布尔分布的风速,对威布尔分布的风速随机取值后获得模拟风速,公式如下:

$$v = c[-\ln(y)]^{\frac{1}{k}}$$

其中, v 为模拟风速, c 为尺度参数, k 为形状参数,出现模拟风速 v 时对应的概率 y 满足 $0 \leq y \leq 1$ 并且出现模拟风速 v 时对应的概率 y 在 $[0, 1]$ 的范围中随机取值;

通过风力发电出力与模拟风速的关系对模拟风速进行计算,获得模拟风速对应的风力发电出力,风力发电出力与模拟风速的关系如下:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci}, v > v_{co} \\ \frac{P_r}{v_r - v_{ci}} v - \frac{v_{ci} P_r}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{co} \end{cases}$$

其中, P_w 为风力发电出力; P_r 为风机的额定出力; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切除风速; v_r 为额定风速。

4. 根据权利要求1所述的风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法,

其特征在于:所述步骤3具体为:

根据电力系统换流站中换流器的准稳态模型,按照下述公式建立含换流器的交直流耦合方程:

$$V_d = N_T \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_T V_t \cos \theta_d - \frac{3}{\pi} X_c I_d \right)$$

$$V_d = N_T k_\gamma k_T V_t \cos \varphi$$

$$I_t = N_T k_\gamma k_T \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

式中, V_t 为电力系统中交流侧的电压; I_t 为电力系统中交流侧的电流; V_d 为电力系统中直流侧的电压; I_d 为电力系统中直流侧的电流; k_T 为直流侧和交流侧之间的换流变压器的变比; N_T 为换流器个数; X_c 为换流器的等效阻抗; θ_d 为换流时换流器设置的控制角; φ 为交流侧的功率相角; k_γ 为考虑换流时换相效应系数; π 为圆周率。

5. 根据权利要求1所述的风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法,其特征在于:所述步骤4具体为:

根据电力系统的交直流潮流方程获取换流器数量和功率之间的关系,利用换流器数量和功率之间的关系,通过以下公式获得各自换流器所在节点的功率平衡方程,对换流器所在节点的功率平衡方程进行建模,获得换流器所在节点的功率平衡方程模型;

电力系统中换流器所在节点i处的功率平衡方程如下:

$$P_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d = 0$$

$$Q_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d \tan \varphi_i = 0$$

其中, P_{is} 为节点i输入的有功功率; Q_{is} 为节点i输入的无功功率; V_i 为节点i的电压; V_j 为节点j的电压; NB 为电力系统中节点的集合; G_{ij} 为线路ij导纳的实部; B_{ij} 为线路ij导纳的虚部;线路ij为节点i与节点j之间的连接线; θ_{ij} 为节点i与节点j之间的相角差; N_T 为换流器个数; V_d 为电力系统中直流侧的电压; I_d 为电力系统中直流侧的电流, φ_i 为交流侧节点i的功率相角。

6. 根据权利要求1所述的风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法,其特征在于:所述步骤5具体为:

利用含换流器的交直流耦合方程和换流器所在节点的节点功率平衡模型获得约束条件,建立满足约束条件的最优调度模型;最优调度模型在给定可变数据下,优化调度发电机组的出力和合理减少负荷的需求使得电力系统的发电代价和减少负荷代价总和最小;

最优调度模型的目标函数为电力系统的发电代价和减少负荷代价总和最小,公式如下:

$$TC = \min \sum_n^{NG} C_n(P_{G,n}) + VOLL \cdot \Delta P_{load}$$

式中,TC为电力系统的发电代价和减少负荷代价总和;NG为电力系统中所有发电机组的集合; $C_n()$ 为发电机组n的发电代价函数; $P_{G,n}$ 为发电机组n的有功出力;VOLL为电力系统的单位负荷减少对应的代价; ΔP_{load} 为电力系统的负荷减少的量;

所述约束条件具体为节点能量平衡约束、节点电压约束、发电机组出力约束、负荷减少约束、线路潮流约束、直流变量约束和控制站控制方式约束；

1) 节点能量平衡约束

节点能量平衡约束包括换流器所在节点的功率平衡方程和纯交流节点的功率平衡方程,所述的纯交流节点为无换流站的节点,纯交流节点包括有发电机组的节点和普通节点；

其中换流器所在节点的功率平衡方程如下式所示：

$$P_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d = 0$$

$$Q_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d \tan \varphi_i = 0$$

其中, P_{is} 节点i输入的有功功率; Q_{is} 为节点i输入的无功功率; V_i 为节点i的电压; V_j 为节点j的电压; NB为电力系统中节点的集合; G_{ij} 为线路ij的导纳的实部; B_{ij} 为线路ij导纳的虚部; 线路ij为节点i与节点j之间的连接线; θ_{ij} 为节点与节点j之间的相角差; N_T 为换流器个数; V_d 为电力系统中直流侧的电压; I_d 为电力系统中直流侧的电流; φ_i 为交流侧节点i的功率相角;

纯交流节点的功率平衡方程如下式所示：

$$P_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

其中, P_{is} 节点i输入的有功功率; Q_{is} 为节点i输入的无功功率; V_i 为节点i的电压; V_j 为节点j的电压; NB为电力系统中节点的集合; G_{ij} 为线路ij导纳的实部; B_{ij} 为线路ij导纳的虚部; 线路ij为节点i与节点j之间的连接线；

2) 节点电压约束

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

其中, V_i 为节点i的电压; V_{\min} 为节点电压下限; V_{\max} 为节点电压上限；

3) 发电机组出力约束

$$P_{G,n}^{\min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\max}$$

$$Q_{G,n}^{\min} \leq Q_{G,n} \leq Q_{G,n}^{\max}$$

其中, $P_{G,n}$ 发电机组n的有功出力; $Q_{G,n}$ 发电机组n的有功出力; 为发电机组n的有功出力最小值; $P_{G,n}^{\max}$ 为发电机组n的有功出力最大值; $Q_{G,n}^{\min}$ 为发电机组n的无功出力最小值; $Q_{G,n}^{\max}$ 为发电机组n的无功出力最大值；

4) 负荷减少约束

$$0 \leq \Delta P_{load} \leq P_{load}^{\max}$$

其中: ΔP_{load} 为电力系统的负荷减少的量; P_{load}^{\max} 为电力系统的允许负荷减少的最大值；

5) 线路潮流约束

$$P_{ij}^{\min} \leq V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij} \leq P_{ij}^{\max}$$

其中, V_i 为节点i的电压; V_j 为节点j的电压; G_{ij} 为线路ij导纳的实部; 线路ij为节点i与节点j之间的连接线; P_{ij}^{\min} 为线路ij的线路容量下限; P_{ij}^{\max} 为线路ij的线路容量上限；

6) 直流变量约束

$$V_{d,k} - N_T (k_{T,k} V_{t,k} \cos \theta_{d,k} - X_{c,k} I_{d,k}) = 0$$

$$V_{d,k} - N_T k_{\gamma,k} k_{T,k} V_{t,k} \cos \varphi_k = 0$$

$$\pm I_{d,k} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{d,kj} V_{d,j} = 0$$

其中, $V_{d,k}$ 为电力系统中换流站k处的直流侧电压, N_T 为换流器个数, $k_{T,k}$ 为换流站k处的换流变压器的变比; $V_{t,k}$ 为电力系统中换流站k处交流侧的电压; $\theta_{d,k}$ 为换流站k处换流器设置的控制角; $X_{c,k}$ 为换流站k处换流器等效阻抗; $I_{d,k}$ 为电力系统中换流站k处直流侧的电流; $k_{\gamma,k}$ 为换流站k处换相效应系数; φ_k 为换流站k处交流侧的功率相角; $g_{d,kj}$ 为节点电导矩阵第k行第j列的元素; n_c 为换流站的集合; 正负号分别对应于交流变换至直流的整流器和直流变换至交流的逆变器;

7) 换流站控制方式约束

$$I_{d,k} - I_{con,k} = 0$$

$$\cos \theta_{d,k} - \cos \theta_{con,k} = 0$$

其中, $I_{con,k}$ 为换流站k在定电流控制方式下设定的电流整定值; $\theta_{con,k}$ 为换流站k在定控制角控制方式下设定的控制角整定值。

7. 根据权利要求1所述的风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法, 其特征在于: 所述电力系统中换流站的个数小于发电机组的个数。

8. 根据权利要求1所述的风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法, 其特征在于: 所述的可靠性参数包括换流器的可靠性参数和发电机组的可靠性参数。

风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种电力系统的可靠性提高方法,具体涉及了一种基于换流器数量的考虑风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法。

背景技术

[0002] 当前,随着能源、环境、气候变化问题的日益突出,发展可再生能源成为世界能源发展的新趋势;另外我国东部经济地区资源贫乏,但对电能需求日渐增加,特高压跨区送电成为解决电力区域共需不平衡矛盾的重中之重。然而,风力发电大规模应用和高比例特高压接入会对电力系统的可靠性带来影响,如风电具有出力不确定性、特高压直流的故障都会导致电力供应出现缺额,因此给电力系统的安全运行带来挑战。

[0003] 目前特高压直流接入电力系统可靠性分析复杂,求解时维数大,求解难度大的问题,以及受端电力系统目前有大量风电接入,进一步加大受端电力系统的可靠性分析重要性。

发明内容

[0004] 为了解决背景技术中存在的问题和需求,本发明提供基于换流器数量的考虑风电不确定性的特高压直流接入电力系统可靠性提高方法,以达到提高电力系统的运行可靠性目的。

[0005] 本发明的技术方案如下:

[0006] 本发明包括步骤如下:

[0007] 步骤1:利用威布尔分布模型模拟风速的累计概率分布;

[0008] 步骤2:对风速的累计概率分布进行处理得到获得模拟风速,通过风力发电出力与模拟风速的关系对模拟风速进行计算获得风力发电出力,实现风力发电出力的不确定性模拟;

[0009] 步骤3:根据电力系统的换流站中换流器的准稳态模型,获得含换流器的交直流耦合方程;

[0010] 步骤4:根据电力系统的交直流潮流方程获取换流器数量和功率的关系,获得各自换流器所在节点的功率平衡方程,确定换流器所在节点的节点功率平衡模型;

[0011] 步骤5:利用含换流器的交直流耦合方程和换流器所在节点的节点功率平衡模型,建立最优调度模型;

[0012] 步骤6:根据电力系统的可靠性参数确定可用换流器个数和发电机组的可用情况,同时获取风力发电出力,然后将可用换流器个数、发电机组的可用情况和风力发电出力输入最优调度模型,最优调度模型根据上述数据进行模型求解,获得负荷减少的量,并由负荷减少的量计算供电不足电量,最后根据供电不足电量进行提高电力系统的可靠性。

[0013] 所述步骤1具体为:

[0014] 威布尔分布模型模拟风速的累计概率分布,公式如下:

$$[0015] \quad y = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

[0016] 式中, v 为模拟风速, c 为尺度参数, k 为形状参数, y 表示出现模拟风速 v 时对应的概率, y 满足 $0 \leq y \leq 1$ 。

[0017] 所述步骤2具体为:

[0018] 将风速的累计概率分布进行处理得到威布尔分布的风速, 对威布尔分布的风速随机取值后获得模拟风速, 公式如下:

$$[0019] \quad v = c[-\ln(y)]^{\frac{1}{k}}$$

[0020] 其中, v 为模拟风速, c 为尺度参数, k 为形状参数, 出现模拟风速 v 时对应的概率 y 满足 $0 \leq y \leq 1$ 并且出现模拟风速 v 时对应的概率 y 在 $[0, 1]$ 的范围中随机取值;

[0021] 通过风力发电出力与模拟风速的关系对模拟风速进行计算, 获得模拟风速对应的风力发电出力, 风力发电出力与模拟风速的关系如下:

$$[0022] \quad P_w = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci}, v > v_{co} \\ \frac{P_r}{v_r - v_{ci}} v - \frac{v_{ci} P_r}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{co} \end{cases}$$

[0023] 其中, P_w 为风力发电出力; P_r 为风机的额定出力; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切除风速; v_r 为额定风速。

[0024] 所述步骤3具体为:

[0025] 根据电力系统换流站中换流器的准稳态模型, 按照下述公式建立含换流器的交直流耦合方程:

$$[0026] \quad V_d = N_T \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_T V_t \cos \theta_d - \frac{3}{\pi} X_c I_d \right)$$

$$[0027] \quad V_d = N_T k_\gamma k_T V_t \cos \varphi$$

$$[0028] \quad I_t = N_T k_\gamma k_T \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

[0029] 式中, V_t 为电力系统中交流侧的电压; I_t 为电力系统中交流侧的电流; V_d 为电力系统中直流侧的电压; I_d 为电力系统中直流侧的电流; k_T 为直流侧和交流侧之间的换流变压器的变比; N_T 为换流器个数; X_c 为换流器的等效阻抗; θ_d 为换流时换流器设置的控制角; φ 为交流侧的功率相角; k_γ 为考虑换流时换相效应系数; π 为圆周率。

[0030] 所述步骤4具体为:

[0031] 根据电力系统的交直流潮流方程获取换流器数量和功率之间的关系, 利用换流器数量和功率之间的关系, 通过以下公式获得各自换流器所在节点的功率平衡方程, 对换流器所在节点的功率平衡方程进行建模, 获得换流器所在节点的功率平衡方程模型;

[0032] 电力系统中换流器所在节点 i 处的功率平衡方程如下:

$$[0033] \quad P_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d = 0$$

$$[0034] \quad Q_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d \tan \varphi_i = 0$$

[0035] 其中, P_{is} 为节点i输入的有功功率; Q_{is} 为节点i输入的无功功率; V_i 为节点i的电压; V_j 为节点j的电压; NB为电力系统中节点的集合; G_{ij} 为线路ij导纳的实部; B_{ij} 为线路ij导纳的虚部; 线路ij为节点i与节点j之间的连接线; θ_{ij} 为节点i与节点j之间的相角差; N_T 为换流器个数; V_d 为电力系统中直流侧的电压; I_d 为电力系统中直流侧的电流, φ_i 为交流侧节点i的功率相角。

[0036] 所述步骤5具体为:

[0037] 利用含换流器的交直流耦合方程和换流器所在节点的节点功率平衡模型获得约束条件, 建立满足约束条件的最优调度模型; 最优调度模型在给定可变数据下, 优化调度发电机组的出力和合理减少负荷的需求使得电力系统的发电代价和减少负荷代价总和最小, 所述给定可变数据包括可用换流器数量、发电机组的可用情况、风力发电出力;

[0038] 最优调度模型的目标函数为电力系统的发电代价和减少负荷代价总和最小, 公式如下:

$$[0039] \quad TC = \min \sum_n^{NG} C_n(P_{G,n}) + VOLL \cdot \Delta P_{load}$$

[0040] 式中, TC为电力系统的发电代价和减少负荷代价总和; NG为电力系统中所有发电机组的集合; $C_n(\cdot)$ 为发电机组n的发电代价函数; $P_{G,n}$ 为发电机组n的有功出力; VOLL为电力系统的单位负荷减少对应的代价; ΔP_{load} 为电力系统的负荷减少的量;

[0041] 所述约束条件具体为节点能量平衡约束、节点电压约束、发电机组出力约束、负荷减少约束、线路潮流约束、直流变量约束和控制站控制方式约束;

[0042] 1) 节点能量平衡约束

[0043] 节点能量平衡约束包括换流器所在节点的功率平衡方程和纯交流节点的功率平衡方程, 所述的纯交流节点为无换流站的节点, 纯交流节点包括有发电机组的节点和普通节点;

[0044] 其中换流器所在节点的功率平衡方程如下式所示:

$$[0045] \quad \begin{aligned} P_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d &= 0 \\ Q_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d \tan \varphi_i &= 0 \end{aligned}$$

[0046] 其中, P_{is} 节点i输入的有功功率; Q_{is} 为节点i输入的无功功率; V_i 为节点i的电压; V_j 为节点j的电压; NB为电力系统中节点的集合; G_{ij} 为线路ij的导纳的实部; B_{ij} 为线路ij导纳的虚部; 线路ij为节点i与节点j之间的连接线; θ_{ij} 为节点与节点j之间的相角差; N_T 为换流器个数; V_d 为电力系统中直流侧的电压; I_d 为电力系统中直流侧的电流; φ_i 为交流侧节点i的功率相角;

[0047] 纯交流节点的功率平衡方程如下式所示:

$$[0048] \quad \begin{aligned} P_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) &= 0 \\ Q_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) &= 0 \end{aligned}$$

[0049] 其中, P_{is} 节点i输入的有功功率; Q_{is} 为节点i输入的无功功率; V_i 为节点i的电压; V_j

为节点j的电压;NB为电力系统中节点的集合; G_{ij} 为线路ij导纳的实部; B_{ij} 为线路ij导纳的虚部;线路ij为节点i与节点j之间的连接线;

[0050] 2) 节点电压约束

$$[0051] \quad V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

[0052] 其中, V_i 为节点i的电压; V_{\min} 为节点电压下限; V_{\max} 为节点电压上限;

[0053] 3) 发电机组出力约束

$$[0054] \quad P_{G,n}^{\min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\max}$$

$$[0055] \quad Q_{G,n}^{\min} \leq Q_{G,n} \leq Q_{G,n}^{\max}$$

[0056] 其中, $P_{G,n}$ 为发电机组n的有功出力; $Q_{G,n}$ 为发电机组n的无功出力; $P_{G,n}^{\min}$ 为发电机组n的有功出力最小值; $P_{G,n}^{\max}$ 为发电机组n的有功出力最大值; $Q_{G,n}^{\min}$ 为发电机组n的无功出力最小值; $Q_{G,n}^{\max}$ 为发电机组n的无功出力最大值;

[0057] 4) 负荷减少约束

$$[0058] \quad 0 \leq \Delta P_{load} \leq P_{load}^{\max}$$

[0059] 其中: ΔP_{load} 为电力系统的负荷减少的量; P_{load}^{\max} 为电力系统的允许负荷减少的最大值;

[0060] 5) 线路潮流约束

$$[0061] \quad P_{ij}^{\min} \leq V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij} \leq P_{ij}^{\max}$$

[0062] 其中, V_i 为节点i的电压; V_j 为节点j的电压; G_{ij} 为线路ij导纳的实部;线路ij为节点i与节点j之间的连接线; P_{ij}^{\min} 为线路ij的线路容量下限; P_{ij}^{\max} 为线路ij的线路容量上限;

[0063] 6) 直流变量约束

$$[0064] \quad V_{d,k} - N_T (k_{T,k} V_{t,k} \cos \theta_{d,k} - X_{c,k} I_{d,k}) = 0$$

$$[0065] \quad V_{d,k} - N_T k_{\gamma,k} k_{T,k} V_{t,k} \cos \varphi_k = 0$$

$$[0066] \quad \pm I_{d,k} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{d,kj} V_{d,j} = 0$$

[0067] 其中, $V_{d,k}$ 为电力系统中换流站k处的直流侧电压, N_T 为换流器个数, $k_{T,k}$ 为换流站k处的换流变压器的变比; $V_{t,k}$ 为电力系统中换流站k处交流侧的电压; $\theta_{d,k}$ 为换流站k处换流器设置的控制角; $X_{c,k}$ 为换流站k处换流器等效阻抗; $I_{d,k}$ 为电力系统中换流站k处直流侧的电流; $k_{\gamma,k}$ 为换流站k处换相效应系数; φ_k 为换流站k处交流侧的功率相角; $g_{d,kj}$ 为节点电导矩阵第k行第j列的元素; n_c 为换流站的集合;正负号分别对应于交流变换至直流的整流器和直流变换至交流的逆变器;

[0068] 7) 换流站控制方式约束

$$[0069] \quad I_{d,k} - I_{con,k} = 0$$

$$[0070] \quad \cos \theta_{d,k} - \cos \theta_{con,k} = 0$$

[0071] 其中, $I_{con,k}$ 为换流站k在定电流控制方式下设定的电流整定值; $\theta_{con,k}$ 为换流站k在定控制角控制方式下设定的控制角整定值。

[0072] 所述电力系统中换流站的个数小于发电机组的个数。

[0073] 所述的可靠性参数包括换流器的可靠性参数和发电机组的可靠性参数。

[0074] 本发明的风力不确定性通过威布尔分布模拟得到,通过获取随机数的方法计算得到风电的出力情况,实现风电出力不确定性的模拟,另外使用换流器个数和发电机组可用情况作为条件计算最优调度模型,获取可靠性分析结果。

[0075] 本发明的有益效果在于:

[0076] 1) 本发明采用威布尔分布模拟方法和基于换流器的交直流模型方法受电力数据的分布特点影响较小,能使用内点法有效收敛至最优解,获得稳定的分析结果。

[0077] 2) 本发明同时考虑风力发电的不确定性和特高压直流的故障概率,对电力系统进行可靠性仿真分析,并针对分析结果进行有效的措施,从而能够达到提高电力系统的运行可靠性目的。

附图说明

[0078] 图1是本发明的技术方案流程图;

[0079] 图2是本发明-实施例的24节点电力系统的拓扑结构图;

[0080] 图3是本发明实施例5个场景的可靠性分析判断结果。

具体实施方式

[0081] 下面结合实施例及其附图对本发明方法作进一步的说明。

[0082] 本发明的实施例及其实施过程如下:

[0083] 特高压指的是直流电压 $\pm 800\text{kV}$ 和交流电压 1000kV 以上的电压。

[0084] 如图1所示,步骤1:根据大多数地区的风速分布具有一定规律,利用威布尔分布模型模拟风速的累计概率分布;

[0085] 威布尔分布模型模拟风速的累计概率分布,公式如下:

$$[0086] \quad y = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

[0087] 式中, v 为模拟风速, c 为尺度参数, k 为形状参数, y 表示出现模拟风速 v 时对应的概率, y 满足 $0 \leq y \leq 1$ 。模拟风速 v 为变量值, c 和 k 为确定的已知参数。

[0088] 步骤2:对风速的累计概率分布进行处理得到获得模拟风速,通过风力发电出力与模拟风速的关系对模拟风速进行计算获得风力发电出力,实现风力发电出力的不确定性模拟;

[0089] 将风速的累计概率分布进行处理得到威布尔分布的风速,对威布尔分布的风速随机取值后获得模拟风速,公式如下:

$$[0090] \quad v = c[-\ln(y)]^{\frac{1}{k}}$$

[0091] 上述公式为对公式 $y = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$ 进行求逆获得;其中, v 为模拟风速, c 为尺度参数, k 为形状参数,出现模拟风速 v 时对应的概率 y 满足 $0 \leq y \leq 1$ 并且出现模拟风速 v 时对应的概率 y 在 $[0, 1]$ 的范围中随机取值;

[0092] 通过风力发电出力与模拟风速的关系对模拟风速进行计算,获得模拟风速对应的风力发电出力,风力发电出力与模拟风速的关系,即风力发电的出力特性函数如下:

$$[0093] \quad P_w = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci}, v > v_{co} \\ \frac{P_r}{v_r - v_{ci}} v - \frac{v_{ci} P_r}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{co} \end{cases}$$

[0094] 其中, P_w 为风力发电出力; P_r 为风机的额定出力; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切除风速; v_r 为额定风速。

[0095] 步骤3: 根据电力系统的换流站中换流器的准稳态模型, 获得含换流器的交直流耦合方程;

[0096] 根据电力系统换流站中换流器的准稳态模型, 按照下述公式建立含换流器的交直流耦合方程:

$$[0097] \quad V_d = N_T \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_T V_t \cos \theta_d - \frac{3}{\pi} X_c I_d \right)$$

$$[0098] \quad V_d = N_T k_\gamma k_T V_t \cos \varphi$$

$$[0099] \quad I_t = N_T k_\gamma k_T \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

[0100] 式中, V_t 为电力系统中交流侧的电压; I_t 为电力系统中交流侧的电流; V_d 为电力系统中直流侧的电压; I_d 为电力系统中直流侧的电流; k_T 为直流侧和交流侧之间的换流变压器的变比; N_T 为换流器个数; X_c 为换流器的等效阻抗; θ_d 为换流时换流器设置的控制角; φ 为交流侧的功率相角; k_γ 为考虑换流时换相效应系数, 在本专利中选为 0.995; π 为圆周率。

[0101] 步骤4: 根据电力系统的交直流潮流方程获取换流器数量和功率的关系, 获得各自换流器所在节点的功率平衡方程, 确定换流器所在节点的节点功率平衡模型;

[0102] 根据电力系统的交直流潮流方程获取换流器数量和功率之间的关系, 利用换流器数量和功率之间的关系, 通过以下公式获得换流器所在节点的功率平衡方程, 换流站包括多个换流器, 即换流器所在节点为换流站所在节点, 电力系统是由节点构成, 节点是电力系统中支路之间的连接点, 风力发电机组、换流站和发电机组均在节点上, 对换流器所在节点的功率平衡方程进行建模, 获得换流器所在节点的功率平衡方程模型;

[0103] 电力系统中换流器所在节点 i 处的功率平衡方程如下:

$$[0104] \quad P_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d = 0$$

$$[0105] \quad Q_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d \tan \varphi_i = 0$$

[0106] 其中, P_{is} 为节点 i 输入的有功功率; Q_{is} 为节点 i 输入的无功功率; V_i 为节点 i 的电压; V_j 为节点 j 的电压; NB 为电力系统中节点的集合; G_{ij} 为线路 ij 导纳的实部; B_{ij} 为线路 ij 导纳的虚部; 线路 ij 为节点 i 与节点 j 之间的连接线; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的相角差; N_T 为换流器个数; V_d 为电力系统中直流侧的电压; I_d 为电力系统中直流侧的电流, φ_i 为交流侧节点 i 的功率相角。

[0107] 步骤5: 利用含换流器的交直流耦合方程和换流器所在节点的节点功率平衡模型, 建立最优调度模型;

[0108] 利用含换流器的交直流耦合方程和换流器所在节点的节点功率平衡模型获得约束条件,建立满足约束条件的最优调度模型;最优调度模型在给定可变数据下,优化调度发电机组的出力 and 合理减少负荷的需求使得电力系统的发电代价和减少负荷代价总和最小,所述给定可变数据包括可用换流器数量、发电机组的可用情况、风力发电出力;

[0109] 最优调度模型的目标函数为电力系统的发电代价和减少负荷代价总和最小,公式如下:

$$[0110] \quad TC = \min \sum_n^{NG} C_n(P_{G,n}) + VOLL \cdot \Delta P_{load}$$

[0111] 式中,TC为电力系统的发电代价和减少负荷代价总和;NG为电力系统中所有发电机组的集合; $C_n()$ 为发电机组n的发电代价函数; $P_{G,n}$ 为发电机组n的有功出力;VOLL为电力系统的单位负荷减少对应的代价; ΔP_{load} 为电力系统的负荷减少的量;

[0112] 约束条件具体为节点能量平衡约束、节点电压约束、发电机组出力约束、负荷减少约束、线路潮流约束、直流变量约束和控制站控制方式约束;

[0113] 1) 节点能量平衡约束

[0114] 节点能量平衡约束包括换流器所在节点的功率平衡方程和纯交流节点的功率平衡方程,纯交流节点为无换流站的节点,纯交流节点包括有发电机组的节点和普通节点;

[0115] 其中换流器所在节点的功率平衡方程如下式所示:

$$[0116] \quad P_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d = 0$$

$$[0117] \quad Q_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \pm N_T V_d I_d \tan \varphi_i = 0$$

[0118] 其中, P_{is} 为节点i输入的有功功率; Q_{is} 为节点i输入的无功功率; V_i 为节点i的电压; V_j 为节点j的电压;NB为电力系统中节点的集合; G_{ij} 为线路ij的导纳的实部; B_{ij} 为线路ij导纳的虚部;线路ij为节点i与节点j之间的连接线; θ_{ij} 为节点i与节点j之间的相角差; N_T 为换流器个数; V_d 为电力系统中直流侧的电压; I_d 为电力系统中直流侧的电流; φ_i 为交流侧节点i的功率相角;

[0119] 纯交流节点的功率平衡方程如下式所示:

$$[0120] \quad P_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$[0121] \quad Q_{is} - V_i \sum_{j \in NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

[0122] 其中, P_{is} 为节点i输入的有功功率; Q_{is} 为节点i输入的无功功率; V_i 为节点i的电压; V_j 为节点j的电压;NB为电力系统中节点的集合; G_{ij} 为线路ij导纳的实部; B_{ij} 为线路ij导纳的虚部;线路ij为节点i与节点j之间的连接线;

[0123] 2) 节点电压约束

$$[0124] \quad V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

[0125] 其中: V_i 为节点i的电压; V_{\min} 为节点电压下限; V_{\max} 为节点电压上限。

[0126] 3) 发电机组出力约束

$$[0127] \quad P_{G,n}^{\min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\max}$$

$$[0128] \quad Q_{G,n}^{\min} \leq Q_{G,n} \leq Q_{G,n}^{\max}$$

[0129] 其中： $P_{G,n}$ 为发电机组n的有功出力； $Q_{G,n}$ 为发电机组n的有功出力； $P_{G,n}^{\min}$ 为发电机组n的有功出力最小值； $P_{G,n}^{\max}$ 为发电机组n的有功出力最大值； $Q_{G,n}^{\min}$ 为发电机组n的无功出力最小值； $Q_{G,n}^{\max}$ 为发电机组n的无功出力最大值；

[0130] 4) 减少负荷约束

$$[0131] \quad 0 \leq \Delta P_{load} \leq P_{load}^{\max}$$

[0132] 其中： ΔP_{load} 为电力系统的负荷减少的值； P_{load}^{\max} 为电力系统的允许负荷减少的最大值；

[0133] 5) 线路潮流约束

$$[0134] \quad P_{ij}^{\min} \leq V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij} \leq P_{ij}^{\max}$$

[0135] 其中， V_i 为节点i的电压； V_j 为节点j的电压； G_{ij} 为线路ij导纳的实部；线路ij为节点i与节点j之间的连接线； P_{ij}^{\min} 为线路ij的线路容量下限； P_{ij}^{\max} 为线路ij的线路容量上限；

[0136] 6) 直流变量约束

$$[0137] \quad V_{d,k} - N_T (k_{T,k} V_{t,k} \cos \theta_{d,k} - X_{c,k} I_{d,k}) = 0$$

$$[0138] \quad V_{d,k} - N_T k_{\gamma,k} k_{T,k} V_{t,k} \cos \varphi_k = 0$$

$$[0139] \quad \pm I_{d,k} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{d,kj} V_{d,j} = 0$$

[0140] 其中， $V_{d,k}$ 为电力系统中换流站k处的直流侧电压， N_T 为换流器个数， $k_{T,k}$ 为换流站k处的换流变压器的变比； $V_{t,k}$ 为电力系统中换流站k处交流侧的电压； $\theta_{d,k}$ 为换流站k处换流器设置的控制角； $X_{c,k}$ 为换流站k处换流器等效阻抗； $I_{d,k}$ 为电力系统中换流站k处直流侧的电流； $k_{\gamma,k}$ 为换流站k处换相效应系数； φ_k 为换流站k处交流侧的功率相角； $g_{d,kj}$ 为节点电导矩阵第k行第j列的元素； n_c 为换流站的集合；正负号分别对应于交流变换至直流的整流器和直流变换至交流的逆变器；

[0141] 7) 换流站控制方式约束

$$[0142] \quad I_{d,k} - I_{con,k} = 0$$

$$[0143] \quad \cos \theta_{d,k} - \cos \theta_{con,k} = 0$$

[0144] 其中， $I_{con,k}$ 为换流站k在定电流控制方式下设定的电流整定值； $\theta_{con,k}$ 为换流站k在定控制角控制方式下设定的控制角整定值。

[0145] 步骤6：根据电力系统的可靠性参数随机模拟可用换流器的个数和发电机组可用情况，向最优调度模型输入风力发电出力，最优调度模型根据可用换流器的个数、发电机组可用情况、风力发电大小对优化调度模型进行求解，求解后获得优化调度之后负荷减少的量 ΔP_{load} ，并根据负荷减少的量 ΔP_{load} 计算供电不足电量EENS，基于供电不足电量EENS提高电力系统的可靠性。

[0146] 具体是首先基于步骤1和步骤2风力出力的获取方式模拟风力发电的不确定性出力。

[0147] 然后通过可靠性参数随机模拟可用换流器的个数，可靠性参数包括换流器的可靠

性参数和发电机组的可靠性参数,以最多4个换流器为例,可用换流器计算方法如下:

$$[0148] \quad N_T = \begin{cases} 4 & x \geq a \\ 3 & b \leq x < a \\ 2 & c \leq x < b \\ 1 & d \leq x < c \\ 0 & 0 < x < d \end{cases}$$

[0149] 其中, N_T 为换流器的个数,其由随机模拟量 x 确定,并且随机模拟量 x 在 $[0,1]$ 范围中随机取值; a, b, c, d 即是换流器的可靠性参数。

[0150] 然后,发电机组是否可用由发电机组的可靠性参数随机模拟得到,其计算方法如下:

$$[0151] \quad S = \begin{cases} 1 & z \geq FOR \\ 0 & 0 \leq z < FOR \end{cases}$$

[0152] 其中, S 为发电机组可用情况,如果 S 为1,则发电机组能够有效调度使用,如果 S 为0,该发电机组将不可用,优化调度模型中将不包含该发电机组;发电机组可用情况其由随机自变量 z 确定,并且随机自变量 z 在 $[0,1]$ 范围中随机取值; FOR 为发电机组的可靠性参数。

[0153] 最后,在获得风力发电出力、可用换流器个数和发电机组可用情况之后,将上述值代入步骤5中最优调度模型并求解,得到电力系统负荷减少的量 ΔP_{load} ,基于负荷减少的量 ΔP_{load} 对供电不足电量EENS进行计算,供电不足电量EENS计算方法如下:

$$[0154] \quad EENS = \Delta P_{load} \cdot 8760$$

[0155] 基于供电不足电量EENS进行提高电力系统的可靠性。

[0156] 根据供电不足电量EENS进行提高电力系统的可靠性,具体为:

[0157] 若供电不足电量EENS大于运行需求的设定值,则电力系统的可靠性未达到预期,可以采用修改风力发电接入比例和特高压直流接入比例的方法改善电力系统的可靠性;

[0158] 若供电不足电量EENS小于运行需求的设定值,则电力系统的可靠性达到预期,不作任何处理。

[0159] 实施例

[0160] 本发明对24节点电力系统进行可靠性情况分析判断,24节点的拓扑结构如图2所示,其中节点17含有换流站,节点18、21、22等含有发电机组,节点1、16、和23含有风力发电机组。电力系统的原始负荷量为2500MW;威布尔分布尺度参数 c ,形状参数 k 分别为7和2;切入风速、切除风速和额定风速为3m/s,20m/s,13.5m/s。最多可用换流器个数为4个;选用供电不足电量作为可靠性分析指标(该值越小越好);选取5个不同的场景对可靠性进行分析。不同比例特高压直流接入容量和风力发电接入容量情况如表1所示:

	场景	发电机 (MW)	特高压直 流(MW)	风力发电 (MW)	总容量 (MW)
[0161]	1	2800	400	250	3450
	2	2400	800	250	3450
[0162]	3	2600	400	450	3450
	4	2400	800	450	3650
	5	2600	800	450	3850

[0163] 上述5个场景的可靠性分析结果如图3所示。

[0164] 由图3可知,场景1中,即是特高压直流和风力发电比例较低时,电力系统可靠性较好;随着特高压直流和风力发电的比例增加时,电力系统的供电不足电量越来越高;在场景4中,特高压直流和风力发电的比例最高,供电不足电量也达到最大,说明此时电力系统可靠性较差,需要采取对应措施提高可靠性。

[0165] 由图3可知,本发明方法能够有效对特高压直流和出力不确定的风电接入的电力系统进行可靠性分析,根据供电不足电量EENS进行提高电力系统的可靠性,具体为:

[0166] 若供电不足电量EENS大于运行需求的设定值,则电力系统的可靠性未达到预期,可以采用修改风力发电接入比例和特高压直流接入比例的方法改善电力系统的可靠性;

[0167] 若供电不足电量EENS小于运行需求的设定值,则电力系统的可靠性达到预期,不作任何处理。由此帮助电力系统合理设置特高压直流接入量和风力发电的接入量,保证电力系统的可靠运行。

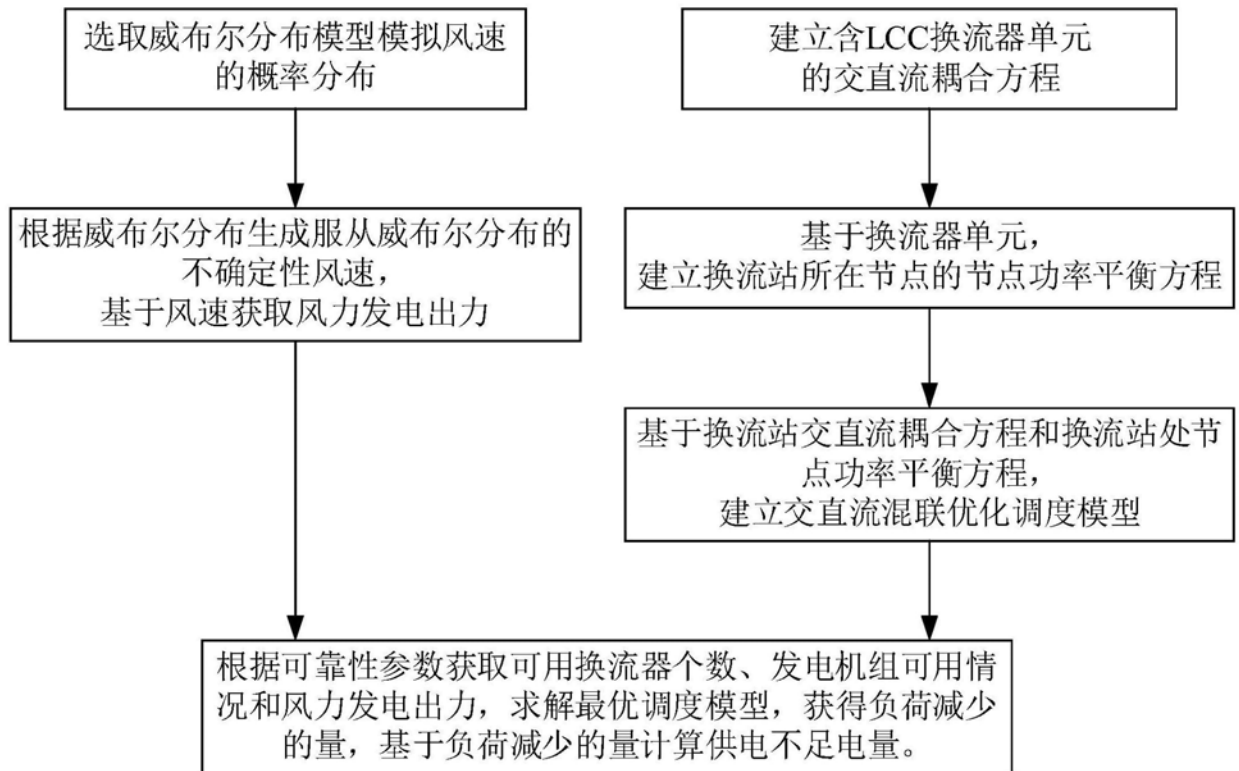


图1

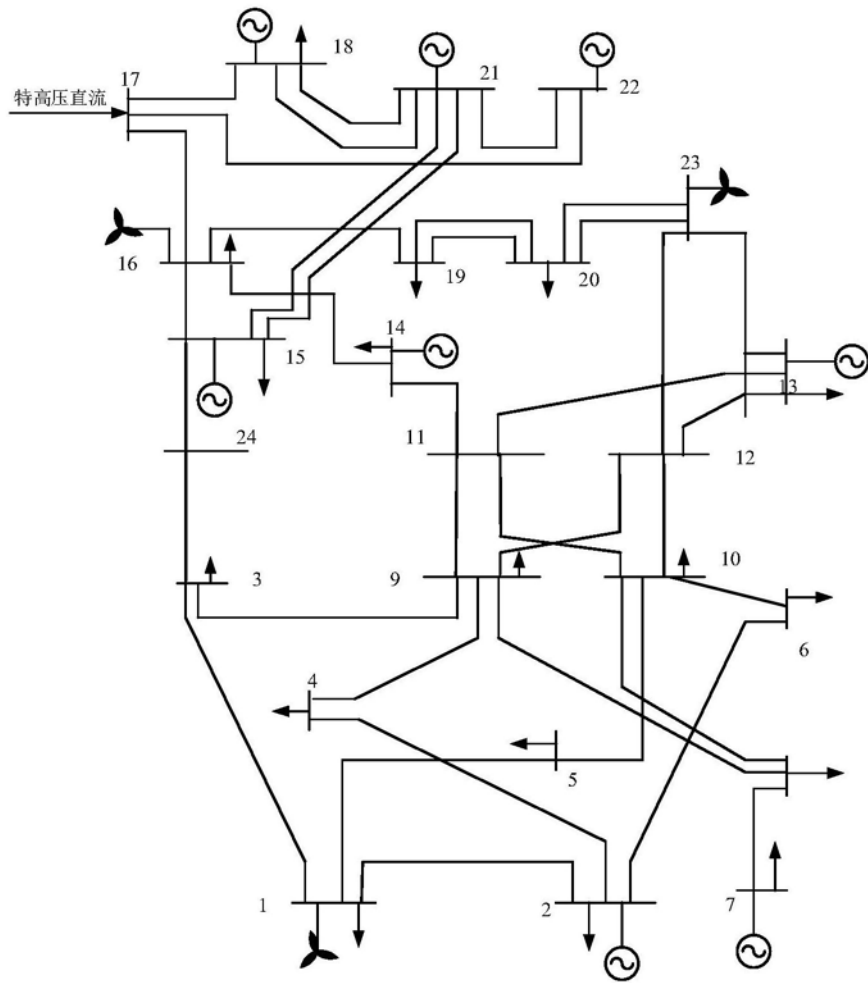


图2

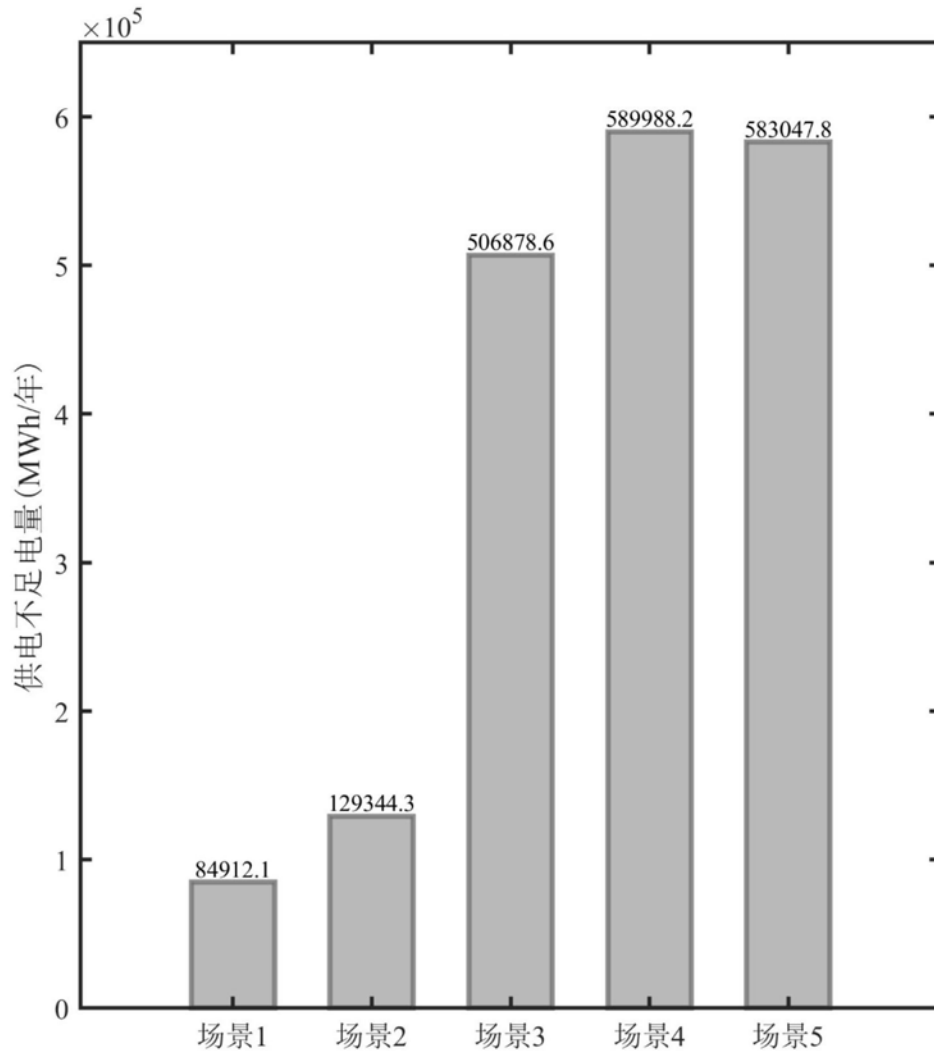


图3