

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H02J 3/00 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200810024722.5

[43] 公开日 2008 年 10 月 1 日

[11] 公开号 CN 101277014A

[22] 申请日 2008.4.30

[21] 申请号 200810024722.5

[71] 申请人 江苏科能电力工程咨询有限公司

地址 211102 江苏省南京市江宁区苏源大道
58 号 3 楼 C 区

[72] 发明人 胡 煜 陶 冶

[74] 专利代理机构 南京天翼专利代理有限责任公
司

代理人 汤志武 朱戈胜

权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 2 页

[54] 发明名称

风力发电接入系统方案选择方法

[57] 摘要

一种风力发电接入系统方案选择方法，步骤包括：1) 选择适宜接入的区域电网；2) 选择适宜接入的电压等级；3) 选择确定电网区域内具备接入条件的接入点；4) 提出接入系统方案；5) 二种典型潮流进行计算，比较各方案潮流分布的合理性、网络损耗；6) 对各方案进行短路电流计算；7) 对方案做经济技术比较；8) 判断风电场选用电机的可调功率因数范围是否满足系统调相调压的要求；9) 综合比较，提出推荐方案；在步骤 6) 和 7) 之间还包括步骤：对风电场接入系统的公共接点产生的电压降落和电压波动进行校核。按照本发明方法选择风力发电接入系统方案，准确、可靠。

1、一种风力发电接入系统方案选择方法，步骤包括：

- 1) 电力平衡，选择适宜接入的区域电网； 2) 根据容量选择适宜接入的电压等级；
- 3) 选择确定电网区域内具备接入条件的接入点；
- 4) 根据电压等级、接入点的不同提出接入系统方案；
- 5) 考虑风电出力的随机性，分别对接入方案在电网高峰、低谷负荷时段风电场满出力运行的二种典型潮流进行计算；比较各方案潮流分布的合理性、网络损耗；
- 6) 对各方案进行短路电流计算；
- 7) 对方案做经济技术比较；
- 8) 依据业主提供的风力发电机组资料进行调相调压计算，得出风电场机组出力情况对各点电压影响，从而判断风电场选用电机的可调功率因数范围是否满足系统调相调压的要求；
- 9) 综合比较，提出推荐方案；

其特征是，在步骤 6) 和 7) 之间还包括步骤：对风电场接入系统的公共接点产生的电压降落和电压波动进行校核，校核方法如下：

模拟计算取投产年电网负荷高峰、低谷时段二种方式，风电场从满出力运行状态、风速超切除风速，风机瞬时全部退出运行这种最严重的随机情况，对各方案接入点电压变动值进行分析比较，从而判断比较各方案接入点电压变动幅值、变动值；

电压变动幅值，即电压降落：

输电线路的电压降落是指线路首末端两点电压的相量差：

$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = (R + jX)\dot{I}_2 = (R + jX)\dot{I}_1$ ，式中 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 分别为线路首末端两点电压相量， R 、 X 分别为一相的电阻和等值电抗， \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 为相电流；

也可以表示为： $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = (R + jX)\dot{I}_2 = \Delta\dot{U}_2 + \delta\dot{U}_2$ ，式中 $\Delta\dot{U}_2$ 和 $\delta\dot{U}_2$ 分别为电压降落的纵分量和横分量；当两点电压之间相角差 δ 不大时，可近似地认为两点间电压绝对值之差，即电压损耗就等于电压降落的纵分量，用功率代替电流，即得

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad , \text{ 式中 } P \text{ 和 } Q \text{ 是分别是负荷的有功功率和无功功率；}$$

考察点的电压波动：

电压波动为： $d = \frac{U - U_N}{U_N} = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% = \frac{R\Delta P + X\Delta Q}{U_N^2} \times 100\%$ ，式中 ΔP 和 ΔQ 为负荷的有功功率和无功功率变化量；测试点的实际电压为 U ，额定电压为 U_N ；

在高压电网中，一般 $X \gg R$ ，则 $d \approx \frac{\Delta Q}{S_{sc}} \times 100\%$ ，式中 S_{sc} 为考察点的短路容量；

对于由某一相间单相负荷变化引起的电压变动 $d \approx \frac{\sqrt{3}\Delta S}{S_{sc}} \times 100\%$ ，式中 ΔS 为负荷容量的变化量；

对于平衡的三相负荷 $d \approx \frac{\Delta S}{S_{sc}} \times 100\%$ ；

上述式中， ΔS 为负荷容量的变化量、 ΔP 和 ΔQ 要根据负荷变化性质确定。

风力发电接入系统方案选择方法

技术领域

本发明属于电力设计技术领域，具体是一种新型设计风力发电接入系统设计方法。

背景技术

风能是一种洁净，无污染，可再生的新型能源。取之不尽、用之不竭，有着良好广阔的发展前景，开发利用风力发电对保护生态平衡，减少环境污染、节约矿物能源，缓解供电矛盾及解决偏远山区的用电问题，支持经济建设都有着重要的社会效益。同时风力发电本身也有许多其它发电方式无法相比的优点如：建设周期短，装机规模灵活，不消耗燃料，不污染环境，不淹没土地等。风力发电是当今世界电力发展的潮流和趋势。随着国产化程度的逐步加大，风力发电机组的建设和运营成本大幅度降低从而给风力发电带来客观的经济效益，全球风能发电，以每年平均 35% 的速度在快速增长。

我国的风能资源仅次于美国和前苏联，位居世界第三。已探明的风能理论储量为 32.26 亿 kW，可利用开发为 2.53 亿 kW。目前我国的发电能源中，火力占 80%，水力占 16%，核能占 3%，风能只占 0.2%。如果仍旧保持这种能源结构，仅供电一项，到 2020 年，我国年需用煤量为 40 亿 t。现在我国已探明的煤炭储量为 1145 亿 t，仅能维持 30 年。能源形势十分严峻，显然，积极大力开发风能是缓解严峻局势的一个极为重要的抉择，也有着巨大的发展空间。

江苏是较早利用风能的地区之一，风能资源较丰富。据各地气象台(站)长期观测资料，全省年平均风速为 3.5m/s，年有效风速时数($V \geq 3 \text{ m/s}$)为 3900 小时，年有效风速频率 44.6%，年风能密度 122.7W / m²，年有效风能 495kW · h / m²。中国气象科学研究院的研究资料显示，江苏的风能资源约有 238 万 kW，在我国列第 10 位。江苏的风能资源主要分布在东部沿海、沿江、沿河、沿湖及丘陵山区。据初步勘察，东部沿海风力资源最为集中。由南向北，江苏东部沿海风力资源主要分布在启东、如东、大丰、射阳、滨海、连云港和赣榆等地区。

之前的接入系统设计一般仅根据电厂容量选择接入电压等级，进行相关潮流、短路、稳定计算之后确定接入点。但由于风电有很强的随机性，受风速变化的影响，风力发电机组会间歇、频繁的启停；当风速变化超出切除风速时，风机会从额定出力状态自动退出运行，如果整个风电场所有风机同时动作，将对电网电网产生电压变动和跌落，给电网运行带来影响；另外，风速的变化和风电机的塔影效应亦会导致风电机出力的变化，同样会引起电网电压的波动，因此除了常规电源接入系统的技术原则和标准外，引起地区电网电压变动和跌落的程度是限制和影响风电场接入系统方案取舍的重要因素，接入系统方案的接入点电能质量应满足国标的要求，而之前的接入系统设计中均未考虑。实际投产后可能会对电网安全运行造成一定的影响。

发明内容

本发明针对上述现有技术的不足，提出一种新的风力发电接入系统设计方法（校核的方法），为接入系统方案的选择提供有力的判据。

步骤 1：电力平衡，选择适宜接入的区域电网；

根据电力平衡分析的结果，通常选择缺乏电源支撑、需要从电网受进电力的区域电网作为适宜接入的电网。

步骤2：根据容量选择适宜接入的电压等级；

原则上100MW以下风电场接入110kV电网，100MW以上风电场可考虑接入220kV电网。由于风电有很强的随机性，它间歇、频繁启停会对电能质量及电网的运行带来影响，因此100MW风电场亦可考虑以220kV电压等级接入系统。

步骤3：选择确定电网区域内具备接入条件的接入点；

首先，接入点要有可用的110kV或220kV间隔；其次，由于风电有很强的随机性，为减少风电间歇频繁启停对电网产生的影响，一定容量的风电场宜选择与系统联系相对紧密（电网短路容量较大）的系统变电所。另外，风电场距离接入点的路径距离不宜太远。

步骤4：根据电压等级、接入点的不同提出接入系统方案；

步骤5：考虑风电出力的随机性，分别对接入方案在电网高峰、低谷负荷时段风电场满出力运行的二种典型潮流进行计算。比较各方案潮流分布的合理性、网络损耗；

步骤6：对各方案进行短路电流计算；

计算方法为：先建立各方案的电网结构，包括线路长度、型号，各变电所负荷分配，电厂出力等，然后对需要验算的点进行短路电流模拟计算。

步骤7：对风电场接入系统的公共接点产生的电压降落和电压波动进行校核

根据“电能质量·电压波动和闪变”国家标准，风电场接入系统的公共接点产生的电压变动限值和变动频度、电压等级有关。

表1 国标中电压变动限值表

r. h ⁻¹	d _r %	
	LV、MV	HV
r≤1	4	3
1<r≤10	3	2.5

注：1、很少的变动额度 r（每日少于1次），电压变动限值 d 还可以放宽，但不在本标准中规定。
 2、对于随机性不规则的电压波动，依95%概率大值取量。
 3、表中：d：电压变动，电压变动特性 d(t)上，相邻两个极值电压之差。
 r：电压变动频度，单位时间内电压变动的次数。
 4、本标准中系统标称电压 U_N等级按以下划分：
 低压(LV) U_N≤1kV
 中压(MV) 1kV<U_N≤35kV
 高压(HV) 35kV<U_N≤220kV

模拟计算取投产年电网负荷高峰、低谷时段两种方式，风电场从满出力运行状态、风速超切除风速，风机瞬时全部退出运行这种最严重（但可能发生）的随机情况，对各方案接入点(PCC点)电压变动值进行分析比较，从而判断比较各方案接入点电压变动、跌落值；

①、电压降落的计算

输电线路的电压降落是指线路首末端两点电压的相量差：

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = (R + jX) \dot{I}_2 = (R + jX) \dot{I}_1 \quad (1)$$

式中， \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 分别为线路首末端两点电压相量， R 、 X 分别为一相的电阻和等值电抗， \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 为相电流。

以相量 \dot{U}_2 为参考轴，如果 \dot{I}_2 和 $\cos\varphi_2$ 已知，可作出相量图如图 1 所示。图中 \overline{AB} 就是电压降相量 $(R + jX)\dot{I}_2$ 。把电压降相量分解为与电压相量 \dot{U}_2 同方向和相垂直的两个分量 \overline{AD} 及 \overline{DB} ，记这两个分量的绝对值为 $\Delta U_2 = AD$ 及 $\delta U_2 = DB$ ，由图 1 可以写出：

$$\left. \begin{array}{l} \Delta U_2 = RI_2 \cos\varphi_2 + XI_2 \sin\varphi_2 \\ \delta U_2 = XI_2 \cos\varphi_2 - RI_2 \sin\varphi_2 \end{array} \right\} \quad (2)$$

于是输电线路的电压降落可以表示为：

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = (R + jX)\dot{I}_2 = \Delta \dot{U}_2 + \delta \dot{U}_2 \quad (3)$$

式中 $\Delta \dot{U}_2$ 和 $\delta \dot{U}_2$ 分别称为电压降落的纵分量和横分量。

在电力网分析中，习惯用功率进行运算。与电压 U_2 和电流 I_2 相对应的一相功率为：

$$S_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2 = P_2 + jQ_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2 + jU_2 I_2 \sin\varphi_2 \quad (4)$$

用功率代替电流，可将式 (2) 改写为：

$$\left. \begin{array}{l} \Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \\ \delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \end{array} \right\} \quad (5)$$

通常，我们把两点间电压绝对值之差称为电压损耗，当两点电压之间相角差 δ 不大时，可近似地认为电压损耗就等于电压降落的纵分量。

2、电压波动的计算

从保证电能质量的要求来看，我们还必须知道网络中某些节点的电压波动。所谓电压波动，是指网络中某点的实际电压同网络该处的额定电压之差，可以用千伏表示，也可以用额定电压的百分数表示。若某点的实际电压为 U ，该处的额定电压为 U_N ，则用百分数表示的电压波动为：

$$d = \frac{U - U_N}{U_N} = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% = \frac{R\Delta P + X\Delta Q}{U_N^2} \times 100\% \quad (6)$$

式中 ΔP 和 ΔQ 为负荷的有功功率和无功功率变化量。

在高压电网中，一般 $X \gg R$ ，则

$$d \approx \frac{\Delta Q}{S_{sc}} \times 100\% \quad (7)$$

式中 S_{sc} 为考察点（一般为 PCC）的短路容量。

对于由某一相间单相负荷变化引起的电压变动

$$d \approx \frac{\sqrt{3}\Delta S}{S_{sc}} \times 100\% \quad (8)$$

式中 ΔS 为负荷容量的变化量。

对于平衡的三相负荷

$$d \approx \frac{\Delta S}{S_{sc}} \times 100\% \quad (9)$$

式 (6) ~ (9) 中， ΔS 、 ΔP 和 ΔQ 要根据负荷变化性质确定。

步骤 8：对方案做经济技术比较；

步骤 9：依据业主提供的风力发电机组资料进行调相调压计算。计算方法为：改变风机出口无功出力，然后进行潮流计算，根据计算结果观察系统接入点电压的变化，得出风电场机组出力情况对各点电压影响，从而判断风电场选用电机的可调功率因数范围是否满足系统调相调压的要求；

步骤 10：综合比较，提出推荐方案。

按照本发明方法选择风力发电接入系统方案，准确、可靠。

附图说明

图 1 是电压降落相量图

图 2 是方案 1 高峰负荷—风机满出力方式切机，接入点母线电压曲线图 3 是方案 2 高峰负荷—风机满出力方式切机，接入点母线电压曲线

两图为实施例工程模拟的不同计算方式下接入点母线电压曲线。通过对曲线实时数据的读取（计算在生成图形的同时可生成精确到 $10^{-2}S$ 的数据表格），按照规程规范计算出该工况下的电压跌落值。

具体实施方式

下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步说明。

以 A 地的甲风电场(100MW)风力发电机组一次接入系统为例说明上述步骤的具体实施过程：

步骤 1：电力平衡结果表明，A 地电网缺少电源，目前 A 地仅有某热电厂 3 台小机 (27MW) 接在 110kVA 地变电站，A 地区的用电负荷主要从所在地区 220kV 主网受进。

本工程（甲风电场风力发电机组）在 2007 年内全部建成投运后，A 地电网仍需从所在地区主网受进电力，因此甲风电场的供电范围为 A 地电网。

步骤 2：甲风电场装机容量 100MW，年电量约 2.1 亿 $\text{kw} \cdot \text{h}$ 电力电量可以被当地电网消纳，结合 A 地电网的现状及风电场装机容量分析，本工程可以 110kV 电压等级接入当地电网；由于风电有很强的随机性，它间歇、频繁启停会对电能质量及电网的运行带来影响，因此甲风电场（100MW）亦可考虑以 220kV 电压等级接入系统。

步骤 3：选择具备接入条件的接入点：220kV 变电站 1、110kV 变电站 2。

步骤 4：I 类方案：甲电场以 110kV 电压等级接入 A 地电网。

方案 1：甲风电场新建一回 110kV 出线接入 220kV 变电站 1 的 110kV 母线。

方案 2：甲风电场新建一回 110kV 出线接入 110kV 变电站 2。

II 类方案：甲风电场以 220kV 电压等级接入 A 地电网。

方案 3：甲风电场新建一回 220kV 出线接入 220kV 变电站 1 的 220kV 母线。

步骤 5：3 个方案高峰负荷时均能满足甲风电场（100MW）功率的送出，系统潮流合理，没有线路过载的问题和矛盾。

低谷负荷时方案 2 中 A 地～变电站 1 线路输送有功为 89MW，达到 LGJ—240 导线热稳极限。另外，由于负荷的不确定性，变电站 2 低谷负荷可能会比模拟值更小，所以需要增大变电站 2～变电站 1 线路导线截面或更换为耐热导线。变电站 1～变电站 3 线路导线型式为 LGJ—240，正常方式下该线路断开运行，但其为变电站 1 重要的备用电源进线。

3 个方案相比较，方案 3 网损最小，方案 1 较方案 2 略小。

步骤 6：对各方案进行短路电流计算，由于 A 地电网地处所在地区电网的终端，系统短路电流水平比较低，甲风电场的接入对电网的短路电流水平影响比较小，3 个接入方案均能满足接入点及附近系统设备短路电流的规范的要求。

步骤 7：电压变动计算结果比较

建立正确的电网结构后，采用软件进行潮流计算（现有技术，在此不作过多限制），并在潮流计算结果的基础上通过上述公式进行，进行暂态稳定计算观察电压变动情况，

表 2 电压变动计算结果比较表

方案、方式		电压变动计算结果比较	
		电压变动幅值 (kV)	变动值 d (%)
方案 1	高峰	0.656	0.57
	低谷	0.585	0.50
方案 2	高峰	2.379	2.05
	低谷	2.108	1.77
方案 3	高峰	1.969	0.89
	低谷	2.850	1.25

步骤 8：从方案的经济比较可知，方案 3 采用 220kV 电压等级接入系统，线路、出线间隔、升压变费用最贵，年费用最大，经济性最差。尽管方案 2 接入点比方案 1 距离

风电场近，但其须把变电站 2～变电站 1 线路 LGJ-240 导线更换为耐热导线，实施起来较为麻烦，且此方案运行网损大；经济性上虽然比方案 1 稍好，但是并没有明显的优势。

步骤 9：依据业主提供的风力发电机组资料进行调相调压计算，由计算结果可知，甲风电场选用的双馈电机的可调功率因数范围（额定功率因数为 1，可以感性 0.95～容性 0.95 范围内设定）满足系统系统调相调压的要求。

步骤 10：从技术、经济综合分析，虽然方案 2 的经济性要稍优于方案 1，但其对接入点的电压变动影响大，且此方案的实施需要停运部分线路加以改造。因此，通过上述方法，推荐技术合理经济性较好的方案 1。

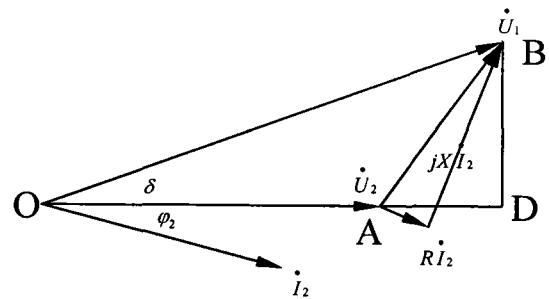


图 1

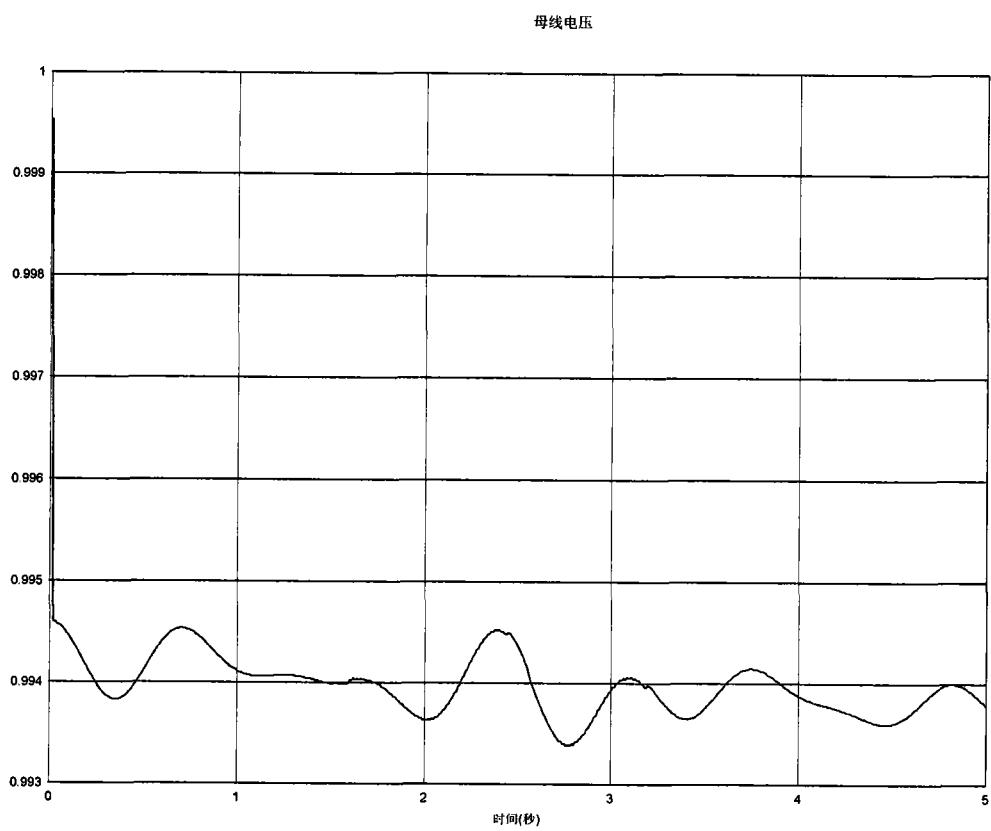


图 2

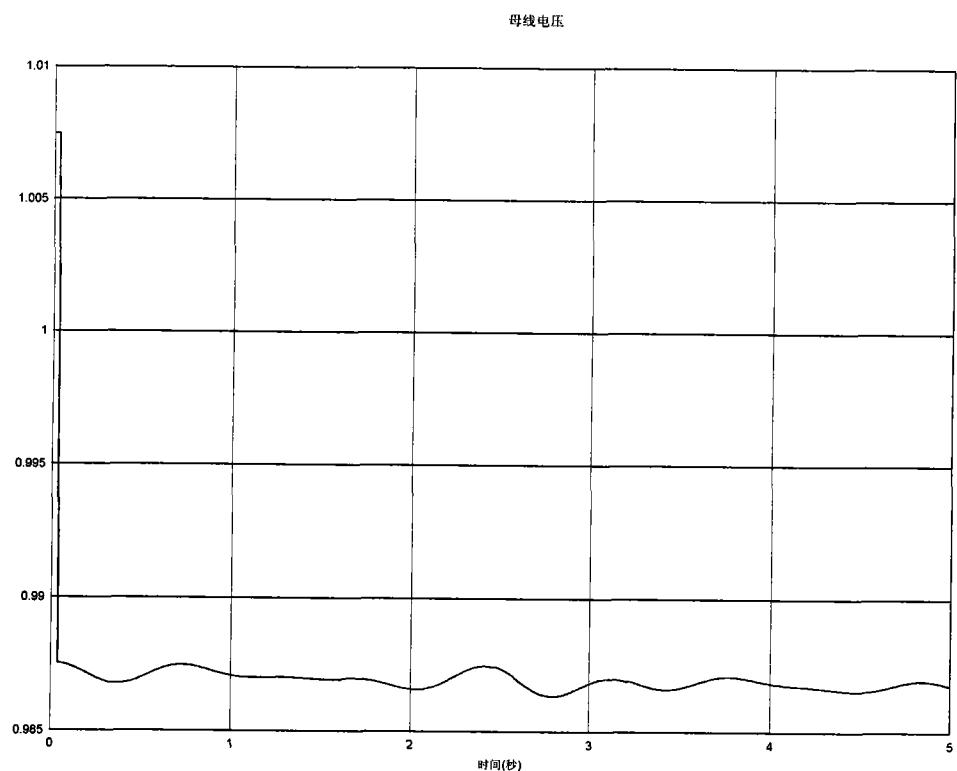


图 3