

风电场无功电源的优化配置方法

张平¹, 刘国频², 曾祥君¹, 李灵¹, 夏云峰¹, 袁超¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 中南勘测设计院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 针对风电场实际运行情况, 提出了有功损耗/无功灵敏度法来确定无功补偿点的方法。该方法是通过选择灵敏系数大的节点作为无功补偿节点, 最大程度地降低风电场有功损耗。首先由 Greedy 算法得到问题的初始解, 然后通过迭代求解, 使得有功损耗最低。最后在实际风电场上对该方法进行了验证, 结果表明该方法可行、有效。

关键词: 灵敏度; 无功补偿; Greedy 算法; 风电场; 有功损耗

Optimal allocation of reactive power source for wind farms

ZHANG Ping¹, LIU Guo-pin², ZENG Xiang-jun¹, LI Ling¹, XIA Yun-feng¹, YUAN Chao¹

(1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;
2. Mid-South Design & Research Institute, Changsha 410076, China)

Abstract: Based on wind farm real operation situation, a novel method using sensitivity analysis for reactive compensation allocations is proposed. In this paper, the sensitivity coefficient is defined as partial derivative of active power losses/reactive power. The nodes which have higher sensitivity coefficient are selected for install capacitors or SVC to reduce the active power losses to the largest extent. The primary solution of the problem is obtained by Greedy algorithm, and then an optimized solution is achieved by iterative solving algorithm. At last, the proposed method is tested in an actual wind farms in Inner Mongolia, computational results show that the proposed method is feasible and effective.

Key words: sensitivity; reactive compensation; Greedy algorithm; wind farm; active power losses

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)20-0033-05

0 引言

近几年, 由于风力发电在经济性和环保性的优势明显, 使得风力发电取得飞速的发展。但适合大规模开发风电的地区一般都处于电网末端, 此处电网网架结构比较薄弱, 而且风能具有随机性和间歇性, 是一种不稳定的能源, 风电机组的有功出力随着风速而随机变化, 因而大型风电机组并网给电力系统安全、稳定运行带来重大的影响, 其中最突出的问题就是风电场及接近风电场的区域电网电压质量严重下降, 因为风电场的并网引起系统无功的变化, 进而影响系统电压, 甚至可能导致电压崩溃。因此, 需要对风电场中的某些节点进行无功补偿可改善风电场的无功功率水平, 提高风电场的电压水平和降低风电场的有功损耗。因此, 风电场的电压稳定性和经济性与无功补偿地点的选择密切相关。

从提高系统电压稳定性为目的而确定无功补偿地点: 文献[1]提出了用电力系统分区方法结合灵敏度分析来确定无功源的最佳配置地点, 以实现无

功补偿分区域平衡, 但系统分区结果的好坏会直接影响到无功补偿地点选择的效果。文献[2]给出了一种基于电压控制先导接点来确定无功配置地点的方法。但电压控制先导接点的选择只是考虑了发电电压调节效益而没有考虑无功补偿点的无功补偿效益, 而且文献采用 Greedy 算法求解可能得到局部最优解。文献[3]基于电压稳定与无功补偿地点相联系, 从无功补偿效益出发, 提出了一种电压/无功灵敏度分析确定无功补偿地点的方法, 由 Greedy 算法得到问题初解, 再迭代求解。

从提高系统经济性为目的而确定无功补偿地点: 文献[4]提出了以系统投资最小和有功损耗最小为目标, 用有功损耗/无功灵敏度分析方法得到无功补偿的初始候选节点, 然后采用 Tabu 搜索对优化问题进行求解的方法。文献[5]利用经济性目标对节点无功注入的灵敏系数计算, 确定配电网补偿容量的最佳位置和最佳容量。

针对以上文献主要应用于配电网系统, 而考虑风电场特殊性, 文献[6]介绍了 WindVAR 风力发电机

具有动态无功补偿控制功能,文献[7]结合软、硬件应用DSP芯片控制电控系统的动态无功补偿,文献[8]在分析风电场的电压稳定性和机端并联电容无功补偿的特性后,采用功率因数确定电容补偿容量的新方法。

现有文献中关于无功电源优化的论文不少,但基本针对配电网系统,而风电场的不多,本文把有功损耗/无功灵敏度法确定无功补偿点的方法应用到内蒙古灰腾梁风电场中,文中先建立风电场内部潮流计算模型,再根据灵敏度系数法建立矩阵模型,将无功补偿地点组合优化问题分解为一系列单个无功补偿地点优化子问题,由Greedy算法得到问题的初解,然后迭代求得最终解,最后运用风电场算例对该算法进行验证。

1 风电场内部潮流计算

1.1 风电场模型建立

本文是根据内蒙古风电场模型来分析的,在通常风电场模型与传统配电网模型相比,主要是风力机模型不同,故先对异步发电机模型进行分析。

1.1.1 异步风力发电机模型

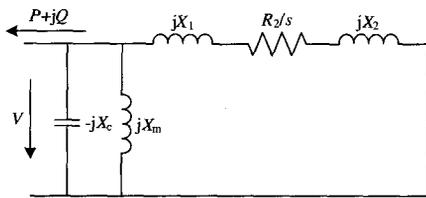


图1 异步发电机简化等值电路

Fig. 1 Simplified equivalent electrical circuit of induction machine

图1是文献[6]异步发电机稳态等值简化电路,其中, x_m 为激励电抗, x_1 为定子漏抗, x_2 为转子漏抗, x_c 为发电机端并联电容器电抗, R_2 为转子电阻, s 为转差,定子电阻忽略。

$$V = \sqrt{\frac{-P(s^2 x^2 + R_2^2)}{R_2 s}} \quad (1)$$

$$Q = -\left(\frac{V^2}{x_p} + \frac{Px}{R_2} s\right) \quad (2)$$

其中: $x = x_1 + x_2$, $x_p = \frac{x_c x_m}{x_c - x_m}$

风力发电机有功输出取决于风速,在潮流计算中,可以考虑发电机有功输出 P 为定值,同时,异步发电机吸收的无功 Q 与机端电压 V 、转差 s 有关,而 V 和 s 的关系由式(1)决定,于是可推出 Q 与 V

的函数关系式:

$$Q = f(V) = \frac{V^2}{x_p} + \frac{-V^2 + \sqrt{V^4 - 4P^2 x^2}}{2x} \quad (3)$$

1.1.2 变压器模型

再对风电场变压器进行分析,风电场中包括两种变压器,两台主变压器为: SFPZ10-150000/220 230±8×1.25%/35 kV, Yn, d11 $U_k=13.5\%$; 200台箱式变压器为: SB9-1600/35 35±2×2.5% kV, Dyn11 $U_k=6.5\%$, 可以进行变压器模型计算。

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2}, X_T = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N}$$

$$B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2}, G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2}$$

1.1.3 线路电缆

线路电缆采用YJV22-3×50mm²-35 kV。

$$r = l \frac{\rho}{s}, b = b_1 l, x = x_1 l, g = g_1 l$$

其中: b_1, x_1, g_1, l, ρ 已知。

1.2 潮流计算

参考文献[9],设基准电压 $U_B=220$ kV,基准容量 $S_B=100$ MW, 220 kV变压器出线口为平衡节点。

根据已建模型,进行线路归算,可得到节点矩阵、发电机矩阵及支路矩阵,在Matlab中运用matpower进行牛顿-拉夫逊法潮流计算。在没有无功补偿的条件下,进行风电场内部潮流计算,得到各个节点的功率损耗及节点电压。其中平衡节点无功功率为负值,表示从系统电网流入风电场的无功功率。如何确定最优补偿点和补偿容量,本论文下一章运用灵敏度法来解决。

2 优化模型

2.1 灵敏度模型建立

用灵敏度法选择候选无功补偿地点,即选出节点无功补偿对减小系统有功网损最有效果的补偿地点集 N_C 。

设系统总的有功损耗看作为系统所有节点的有效功率代数和:

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_B} P_i = \sum_{i=1}^{N_B} V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (4)$$

其中: P_L 为风电场有功损耗, P_i 为节点注入有功, G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵元素 Y_{ij} 的实部和虚部。对式(4)关于 Q_i 求导,得节点无功变化对系

统有功损耗的灵敏度为:

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_i} = \frac{\partial P_L}{\partial V} \frac{\partial V}{\partial Q_i} + \frac{\partial P_L}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial Q_i} \quad (5)$$

对式(5)进行简化, 得到如下

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial V} \\ \frac{\partial P_L}{\partial \delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial V} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial P_L}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

而且

$$\begin{cases} \frac{\partial P_L}{\partial V} = \frac{\partial P_L}{\partial V} \frac{\partial P_L}{\partial V} + \frac{\partial Q_i}{\partial V} \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \\ \frac{\partial P_L}{\partial \delta} = \frac{\partial P_L}{\partial \delta} \frac{\partial P_L}{\partial \delta} + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{cases} \quad (7)$$

可得到

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q} = (J_{PV}^{-1} J_{QV} - J_{P\theta}^{-1} J_{Q\theta})^{-1} (J_{PV}^{-1} J_{PV} - J_{P\theta}^{-1} J_{P\theta}) = S \quad (8)$$

在以上方程中有:

$$\frac{\partial P_L}{\partial V} = 2 \sum_{j=1}^{N_b} V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial \delta_i} = -2V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j G_{ij} \sin \delta_{ij} \quad (10)$$

其中: N_b 表示网络节点数, S 是系统有功损耗/无功灵敏度矩阵系数, J_{PV} 表示 $\partial P_L / \partial V$ 雅可比矩阵, $J_{P\theta}$ 表示 $\partial P_L / \partial \theta$ 雅可比矩阵, J_{QV} 表示 $\partial Q_i / \partial V$ 雅可比矩阵, $J_{Q\theta}$ 表示 $\partial Q_i / \partial \theta$ 雅可比矩阵, J_{PLV} 表示 $\partial P_L / \partial V$ 雅可比矩阵, $J_{PL\theta}$ 表示 $\partial P_L / \partial \theta$ 雅可比矩阵。当 ΔP_L 、 ΔQ_i 分别表示有功损耗、无功变化很小时, 可以假设 $\frac{\Delta P_L}{\Delta Q_i} \approx \frac{\partial P_L}{\partial Q_i}$, 那么就会有:

$$\Delta P_L = S \times \Delta Q_i \quad (11)$$

S 中第 i 个对角元素是节点 i 的有功损耗/无功灵敏度。灵敏度大表示调节具有最大有功损耗控制效力的控制变量, 对全系统有功损耗最小目标最为有利。根据有功损耗控制效力的大小, 按照从大到小顺序依次调节控制变量, 既能够有效减少有功损耗, 又避免了控制同时动作可能造成的系统震荡, 具有重要的意义。

2.2 无功补偿节点选择优化模型

设在系统中要选择的主导节点个数 N , 无功补

偿节点的集合为 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}, n = N$; 在

系统的某个运行点, 考虑无功补偿节点由于其无功补偿设备的无功补偿效应, 则系统无功电压关系变为:

$$\Delta P_L' = S' \times \Delta Q_i \quad (12)$$

式中: $\Delta P_L'$ 、 ΔQ_i 分别为系统有功损耗和无功功率的变化(对某运行节点进行无功补偿后); S' 为有功损耗/无功灵敏度矩阵, 即原系统矩阵中对某运行节点进行无功补偿后的矩阵。由式(11)和(12)得到系统节点的有功损耗/无功灵敏度变化为:

$$D = \text{diag}(S) - \text{diag}(S') \quad (13)$$

式中: $\text{diag}(\cdot)$ 表示取 m 阶矩阵的对角元素形成的 m 维列向量。 S 和 S' 分别为系统节点在无功补偿之前和补偿之后的有功损耗/无功灵敏度矩阵。

选择无功补偿节点的目标是使系统节点的有功损耗/无功灵敏度指标最有效的增大。可以如下描述目标函数极大化问题, 即通过选择无功补偿节点 X , 使得目标函数式(14)达到最大。

$$J(X) = D^T Q_x D \quad (14)$$

其中: Q_x 为对角加权矩阵, 可根据负荷的具体情况来确定其数值。

所以无功补偿节点的选择问题可以描述为以下模型:

$$\begin{aligned} & \text{Max} J(X) \\ & \text{st. } X \subset C \\ & \text{Card}(X) \leq N \end{aligned} \quad (15)$$

式中: X 为所有无功补偿节点的集合; C 为系统所有节点的集合; $\text{Card}(\cdot)$ 表示集合元素的总数; N 为系统要求的无功补偿节点的总数。

3 求解算法

式(15)是一个组合优化问题, 有多种方法可以进行求解。最简单的方法是全局搜索法, 即所有可能的无功补偿节点集都进行计算, 根据其目标函数值的大小来确定最终的无功补偿节点集。此方法容易实现, 但计算量大。参考文献[6], 可采用迭代计算求解方法, 其基本思想是: 将无功补偿节点组合优化问题分解成一系列单个无功补偿节点优化子问题, 并给出确定单个无功补偿节点的算法, 由 Greedy 算法求解得到问题的初始解, 然后通过迭代求解方式得到整个问题的解, 其流程如图2所示。其具体算法描述如下:

- ①令 $X_0^{(0)}$ 取空集, $k=1, t=0$;
- ②寻找 $x_k^{(0)} = \max J(X_0^{(k-1)} \cup \{x\}), x \in C$ 且 $x \notin X_0^{(k-1)}$;
- ③如果 $J(X_0^{(k-1)} \cup \{x_k^{(0)}\}) \leq J(X_0^{(k-1)})$, 则停止计算, $X_0^{(k-1)}$ 为Greedy的初始解;
- ④如果 $J(X_0^{(k-1)} \cup \{x_k^{(0)}\}) > J(X_0^{(k-1)})$, 则令

$$X_0^{(k)} = X_0^{(k-1)} \cup x_k^{(0)};$$

- ⑤如果 $Card(X_0) = N$ 或 $J(X_0^{(k)}) - J(X_0^{(k-1)}) < \varepsilon$, 则停止计算, 否则, $k=k+1$, 转到步骤②;
- ⑥迭代计算, 令 $t=t+1$ 计算求解。

$$x_j = \max J(\{x_1^{(t)}, \dots, x_{j-1}^{(t)}, x_{j+1}^{(t)}, \dots, x_n^{(t)}\}),$$

$$1 \leq i \leq n, X_t = \{x_1^{(t)}, x_2^{(t)}, \dots, x_n^{(t)}\}$$

此式对前一次求解结果进行校正迭代计算, 在对任意一个无功补偿节点进行校正时把其余无功补偿节点当作已知的, 采用遍历法对单个无功补偿节点进行最优化, 选择使目标函数最大的解作为所求的无功补偿节点。

- ⑦当 $J(X_t) < J(X_{t-1})$, 则停止计算, X_{t-1} 为解;
- ⑧当 $J(X_t) - J(X_{t-1}) < \varepsilon$, 则停止计算, 当 $t \geq t_{\max}$,

则停止计算, X_t 为解。否则转到步骤⑥。

其中: t_{\max} 是最大迭代次数, ε 是目标函数增量的最小阈值。

以上算法是将一个组合优化的问题分解成一系列单个无功补偿节点优化问题。它具有以下优点:

- 1) 运用Greedy算法求解得到组合问题初值, 好的初值可以减少计算量。
- 2) 使用迭代计算方法对初值进行校正, 因为单个无功补偿节点优化算法得到单个问题最优解, 因此, 通过迭代计算能够有效地得到组合问题的最优解。

4 算例

内蒙古灰腾梁风电场, 占地总面积102.7 km², 各风力发电机分布不集中, 由200台单机1500 kW的

FL1500/70的机组组成, 装机容量300 MW。风力发电机组经箱变T2升压至35 kV后, 采用35 kV交联聚乙烯电力电缆, 200台箱变共分20组, 每组10台, 再通过20条35 kV电压线路汇集到1座两台容量为2×150000 kVA主变T1的220 kV升压变电站。

其中风力发电机的功率因素为1.0, 不发无功, 也不吸收无功, 因此, 风电场的无功电源主要有电容补偿装置无功功率和电缆的充电功率。

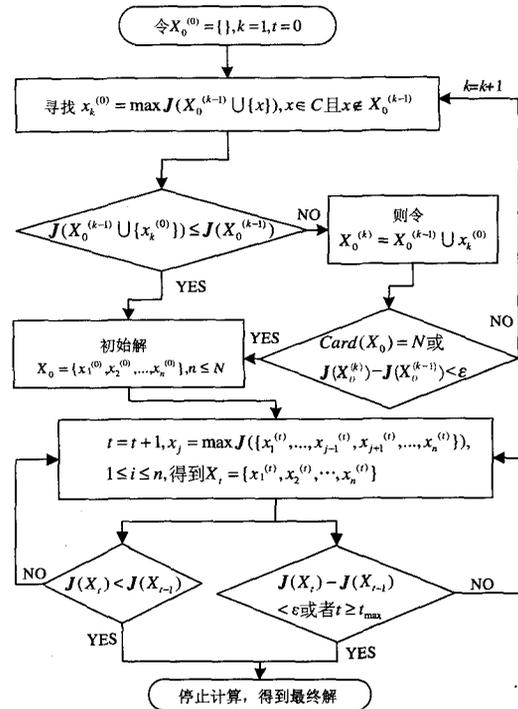


图2 算法流程图

Fig.2 Flow chart for algorithm

为了验证本文提出的基于灵敏度法确定无功补偿地点的方法在减少有功损耗的作用, 本文在内蒙灰腾梁风电场模型上运用Matlab和ATP进行仿真分析。说明: 本课题组在完成火电厂无功补偿软件设计的基础上, 再对该风电场进行无功补偿的优化及软件设计, 并且也已经完成了该风电厂的软件设计, 由于该风电场模型有403个节点, 结构较复杂, 不方便在论文画出, 故在此只对该风电场其中42个节点如图3进行验证分析说明。其中T1为1.1模型中的主变压器, T2为箱式变压器, 风力机模型在1.1介绍过, 线路节点之间考虑线路功率损失, 以在3个节点上安装SVC为例进行仿真计算。

实际上确定无功补偿地点需要满足此方程(16)前提下, 再求有功损耗最少。

$$\sum Q = \Delta Q T1 + \sum \Delta Q T2 + \Delta Q X - Q_{c1} \quad (16)$$

其中: $\sum Q$ 表示总无功损耗, $\Delta Q T1$ 表示主变无功损

耗, $\sum \Delta Q T^2$ 表示箱变无功损耗, $\Delta Q X$ 表示集电线路无功损耗, Q_{c1} 表示集电线路充电功率。

为了说明本文提出方法的有效性, 设计了 3 种方案进行以下仿真计算。

方案 1, 不安装 SVC。

方案 2, 采用目前常用的集中补偿方案, 即选 41 节点, 并且安装 SVC。

方案 3, 按照本文提出的基于灵敏度分析来选择无功补偿节点的方法。求得三个节点即 41、11 和 31 作为无功补偿点, 安装总容量与方案 2 安装的 SVC 相同。

从表 1 可以看出: 方案 3 对比方案 1、方案 2, 在出力条件相同的情况下, 前者有功损耗要明显小于后两者, 且电压更加稳定, 方案 1 无功不足, 故有功损失增大, 电压明显不稳定, 只是无功损失少些。因此用本文的方法选择的无功补偿地点 (方案

3) 使得风电场的有功损耗最小, 同时无功损耗也较少, 系统的电压稳定性得到一定程度的提高。但是, 不同补偿点的容量不一定相同, 这就需要该软件不断改进。

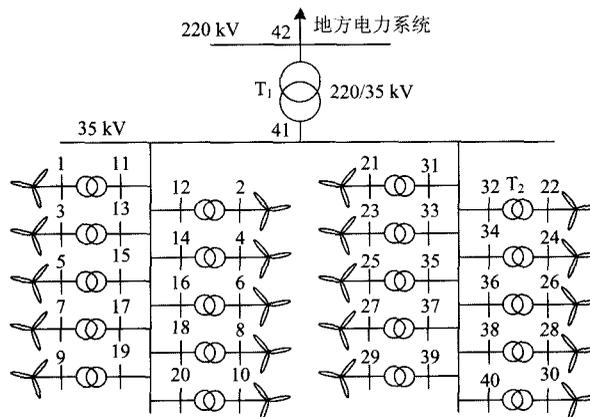


图 3 风电场 42 节点结构图

Fig.3 Structure diagram of wind farm

表 1 在不同出力条件下不同补偿方案的效果

Tab.1 The efficiency of capacitor compensation under various wind turbines output

P、Q、V	在各种出力条件下 Q 损耗/Mvar					在各种出力条件下 P 损耗/MW					V/p.u	
	60%	70%	80%	90%	100%	60%	70%	80%	90%	100%	V_{\min}	V_{\max}
方案 1	4.57	4.92	6.54	8.96	11.24	4.05	5.86	7.12	8.55	9.68	0.78	0.95
方案 2	6.45	8.05	10.15	13.15	16.45	2.15	2.96	4.13	5.51	7.98	0.92	1.02
方案 3	5.73	7.2	9.25	12.34	15.87	1.95	2.65	3.78	5.05	7.51	0.96	1.01

5 结论

本文将有功损耗与无功补偿地点的选择相结合, 提出一种灵敏度法确定无功补偿地点的风电场无功电源优化配置的方法, 效果明显, 且易于实现。在内蒙古风电场部分模型中经 Matlab 和 ATP 仿真, 结果表明用该方法确定的无功补偿地点对降低风电场有功功率损耗和电压稳定都具有良好的效果。

参考文献

- [1] 胡彩娥, 杨仁刚. 用电力系统分区方法确定无功源最佳配置地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16 (3): 46-49.
HU Cai-e, YANG Ren-gang. Optimal Allocation of Reactive Power Sources Using Net Work Partition [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2004, 16 (3): 46-49.
- [2] 姚小寅, 孙元章, 王志芳. 电力系统无功源最佳配置地点的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3): 12-15.
YAO Xiao-yin, SUN Yuan-zhang, WANG Zhi-fang. Studies on the Optimal Allocation of Reactive Power Sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (3): 12-15.
- [3] 刘君华, 方鹏飞, 吕岩岩. 基于灵敏度法确定无功补偿地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18 (4): 62-65.

LIU Jun-hua, FANG Ge-fei, LÜ Yan-yan. Allocation of Reactive Compensation Using Sensitivity Analysis Approach [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2006, 18 (4): 62-65.

- [4] Huang Y C, Yang H T. Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (4): 1868-1873.
- [5] Delfanti M, Granelli G P, Marannino P, et al. Optimal Capacitor Placement Using Deterministic and Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (3): 1041-1046.
- [6] 李广凯. 风力发电中的无功控制 [J]. 国际电力, 2005, 8(4): 32-34.
LI Guang-kuai. Reactive Power Control in Wind Power [J]. International Electric Power for China, 2005, 8(4): 32-34.
- [7] 陈实, 谢少军. 大型并网风电机组动态补偿装置的研究 [J]. 华北电力技术, 2004, (4): 30-33.
CHEN Shi, XIE Shao-jun. Research on Dynamic Reactive Power Compensation of Large-scale Wind Power Unit [J]. North China Electric Power, 2004, (4): 30-33.

(下转第 44 页 continued on page 44)

参考文献

[1] 广东省科学技术厅.配电网中性点快速消弧线圈快速选线跳闸接地运行方式的应用研究.科技成果鉴定证书[Z].粤科鉴字[2005]041号.2005,3(3).

[2] 陆国庆,姜新宇,欧阳旭东,等.高短路阻抗变压器式自动快速消弧系统—配电网中性点新型接地方式的实现[J].电网技术,2000,24(7):25-28.
LU Guo-qing, JIANG Xin-yu, OUYANG Xu-dong, et al. An Automatic Rapid Arc Suppression System Based on Transformer with High Short Circuit Impedance—Implementation of a New Approach of Neutral Grounding for Distribution Network[J]. Power System Technology, 2000,24(7):25-28.

[3] 陆国庆,姜新宇,梅中健,等.配电网中性点接地的新途径[J].电网技术,2004,28(2):32-35.
LU Guo-qing, JIANG Xin-yu, MEI Zhong-jian, et al. A New Approach to Neutral Grounding in Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2004,28(2):32-35.

[4] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2000.

YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonance Ground of Electric Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

[5] DL/T 872-2004,小接地电流系统单相接地保护装置[S]. DL/T 872-2004, Specification of Single Phase Relay in Non-effective Earthed Power System[S].

[6] DL/T 1057-2007,自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术条件[S]. DL/T 1057-2007, Specification of Arc Suppressing Coil Apparatus with Automatic Tracking and Compensation[S].

[7] 张山,杨玉昆,潘华东,等.KD-XH型智能化快速消弧系统应用效果分析[J].高电压技术,2001,27(4):77-78.
ZHANG Shan, YANG Yu-kun, PAN Hua-dong, et al. Analysis of Application of KD-XH Intelligent Arc Suppressing Coil[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4):77-78.

收稿日期:2008-01-07; 修回日期:2008-01-22
作者简介:

陈锐(1976-),男,工程硕士,从事电力系统试验和研究工作。E-mail:cray@163.com

(上接第37页 continued from page 37)

[8] 郭敏.风电场机端无功补偿的探讨[J].内蒙古电力技术,2006,24(3).
GUO Min. Research on Reactive Compensation for Generator End of Wind Power Site[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2006,24(3).

[9] 陈金贵,陈海焱,段献忠.含分布式电源的配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2006,30(1):39-44.
CHEN Jin-gui, CHEN Hai-yan, DUAN Xian-zhong. Study on Power Flow Calculation of Distribution System with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems,

2006,30(1):39-44.

收稿日期:2008-03-08; 修回日期:2008-05-08
作者简介:

张平(1982-),男,硕士,从事电力系统继电保护的研究和开发工作; E-mail: zp06108@126.com
刘国频(1965-),男,高级工程师;
曾祥君(1972-),男,博士,教授,从事电力系统微机保护与控制的教研和研究开发工作。

(上接第40页 continued from page 40)

[8] Farmer R G, Svchwalb A L, Kvate E. Navajo Project Report on Sub Synchronous Resonance Analysis and Solutions[J]. IEEE Trans on PAS, 1977:1266-1232.

[9] Wolff R F. Stop Sub Synchronous T/G-Shaft Damage[J]. Electrical World, 1981:129-133.

[10] 李岩松.基于统一潮流控制器的阻尼次同步谐振的研究[M].北京:华北电力大学,2000.
LI Yan-song. Research on Damping Subsynchronous Resonance Based on United Power Flow Controller[M]. Beijing: North China Electric Power University, 2000.

[11] Xing K, Kusic G L. Damping Subsynchronous Resonance by Phase Shifters[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1989, 4(3):344-350.

[12] 倪以信,等.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002.
NI Yi-xin, et al. Theoretical Analysis of Dynamic of Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[13] LI Wang. Damping of Torsional Oscillation Using Excitation Control of Synchronous Generator, the IEEE Second Benchmark Model Investigation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991,6(1).

收稿日期:2007-12-26; 修回日期:2008-01-09
作者简介:

刘燕(1984-),女,硕士研究生,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail:aacd.4321@163.com