

电网结构对短路电流水平及受电能力的影响分析

杨冬¹, 刘玉田¹, 牛新生²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力研究院, 山东 济南 250002)

摘要: 针对 220 kV 分区电网的两种典型结构模式, 利用基本电路理论建立短路电流模型, 在此基础上论述电网结构对短路电流水平及受电能力的影响。以 2008 年济南电网的短路电流计算分析为例, 说明了该模型的适用性, 计算结果表明改善电网结构可有效控制系统短路电流水平, 提高分区电网受电能力。

关键词: 电网结构; 短路电流; 受电能力; 分区规模

Analysis on influence of power grid structure upon short circuit level and power receiving capability

YANG Dong¹, LIU Yu-tian¹, NIU Xin-sheng²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

Abstract: In allusion to two typical structure modes in 220 kV district power grid, a short circuit current model is established on the basic circuit theory. The influence of power grid structure upon short circuit level and power receiving capability is also discussed. Taking the short circuit current calculation of Jinan power grid in the year of 2008 as example, the applicability of this model is verified. The computation results show that improving the power grid structure, as an effective means, can not only control short circuit level but also augment power receiving capability.

Key words: power grid structure; short circuit current; power receiving capability; district power grid scale

中图分类号: TM715; TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0062-06

0 引言

电网短路电流水平超标问题, 不但威胁系统的安全、稳定运行, 而且直接影响电网运行的经济性。解决短路电流问题有两个方向, 一是直接更换开关设备, 二是采取限制短路电流的措施。更换开关设备适用于局部短路电流过大的情况, 当整个系统短路电流水平提高时, 更换开关设备的费用很大, 这时应考虑采取限制短路电流的措施, 改善电网结构就是其中行之有效的办法^[1]。

文献[2~5]从电网规划的角度出发, 论述了改善电网结构是限制短路电流的直接、有效的方法。这些文献大多针对具体电网, 研究改善电网结构的措施, 给出定性结论, 缺乏对普遍适用的短路电流模型的分析。文献[6]用统计的方法预测超高压系统的短路电流水平, 但该方法需要历年的短路电流统计数据, 适合对网架较成熟、发展较缓慢的电网进行预测。文献[7]提出了一种用于 220 kV 电网短路电流预测的方法, 给出了短路电流模型, 但并未结合模型进一步分析电网结构对控制系统短路电流, 提

高分区电网受电能力的影响。

本文针对 220 kV 分区电网的两种典型结构模式, 利用基本电路理论建立短路电流模型, 在此基础上论述电网结构对短路电流水平及受电能力的影响。以 2008 年济南电网的短路电流计算分析为例, 说明了该模型的适用性, 计算结果表明改善电网结构可有效控制系统短路电流水平, 提高分区电网受电能力。

1 分区电网短路电流模型

根据电网规划远景年份的分层分区情况, 对于 220 kV 分区电网结构, 本文主要考虑图 1 所示的两种模式。其中, 图 1 (a) 所示模式称为模式 1, 图 1 (b) 所示模式称为模式 2。与之对应的系统短路电流计算模型如图 2 所示。其中, X_{500} 为 500 kV 系统等效短路阻抗, X_{220} 为 220 kV 系统等效短路阻抗, X_T 为 500 kV 变电站等值阻抗。500 kV 变电站的 220 kV 母线是分区电网的短路电流控制节点。短路电流控制节点上的短路电流水平由 500 kV 主变和接入 220 kV 分区电网的地方电源共同决定。

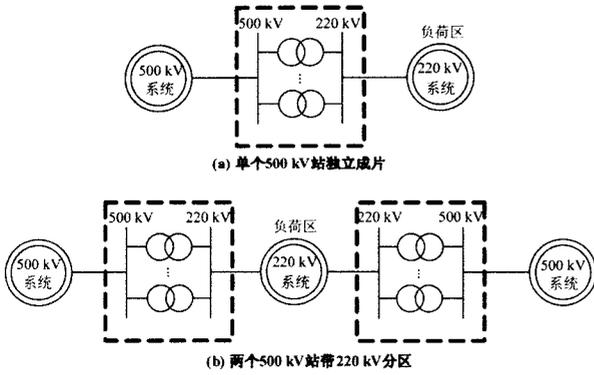


图1 分区电网结构模式

Fig.1 Modes of district power grid structure

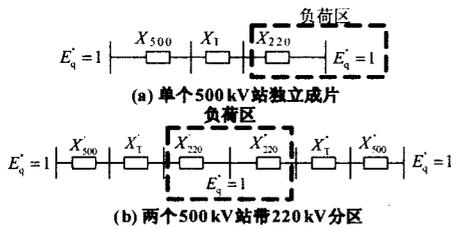


图2 短路电流计算模型

Fig.2 Short circuit current models

假设发电机采用5阶模型,短路瞬时发电机用 E_q'' 和 x_d'' 等值;由于机械和电磁惯性作用的结果,感应电动机在短路瞬时向短路点倒送短路电流,其也可用 E_q'' 和 x_d'' 等值^[8];不考虑负荷中的非感应电动机因素;忽略对地支路和电阻影响。

取 $S_B=100$ MVA, $U_B=525$ kV, 则500 kV系统等效短路阻抗 X_{500} 可表示为:

$$X_{500} = 100 / (\sqrt{3} \times 525 \times I_S) \quad (1)$$

其中: I_S 为500 kV系统注入变电站的短路电流(有名值kA)。

分区电网内各发电机及感应电动机对变电站220 kV母线的转移阻抗,取决于220 kV系统的电网结构。如果除了某一个电动势以外,其它电动势均为零,则电动势与短路点电流之比值即为此电源与短路点之间的转移阻抗。所有电源对变电站220 kV母线的转移阻抗的并联就是分区电网对220 kV母线的等值阻抗 X_{220} 。

假定随着分区电网装机容量 S_{220} 的变化,①接入分区电网的各发电机次暂态直轴电抗 x_d'' (基于发电机容量标么值)不变;②各发电厂容量占分区装机总容量的百分比 $S\%$ 不变,即分区电网不新建电厂,原有电厂容量保持同比例增长;③各发电机升压变短路阻抗百分比 X_{GT} (基于变压器容量标么值)不变;④考虑到分区网络拓扑随装机容量的增

大而加强的实际情况,可假定各电源对变电站220 kV母线的转移阻抗 X_{GL} (基于分区装机总容量标么值)不变,则当 X_{GL} 折算为 S_B 下标么值时,可反映出电源转移阻抗随分区装机容量的增大而减小;⑤感应电动机对变电站220 kV母线的等值阻抗 X_{ML} (基于分区装机总容量标么值)不变。220 kV系统等效短路阻抗 X_{220} 随分区电网装机容量 S_{220} 变化的关系可表示为:

$$1/X_{220} = 1/(X_{ML} \times 100 / S_{220}) + \sum_{i=1}^N 1/[(X_{di}'' + X_{GTi}) \times 100 / S_{220} \times S_i\% + X_{GLi} \times 100 / S_{220}] \quad (2)$$

其中: N 为发电机个数,等式右边第一项表示感应电动机作用,第二项表示发电机作用。

考虑500 kV开关遮断容量为63 kA(折算标么值为572.9),220 kV开关遮断容量为50 kA(折算标么值为190.5)。随着系统的不断加强,500 kV母线的短路容量将接近500 kV开关遮断容量,220 kV母线的短路容量也将接近220 kV开关遮断容量。理想情况下,为使整个系统的容量最大,500 kV侧开关和220 kV侧开关应同时达到开关遮断容量。由此可得,500 kV和220 kV系统的最优极限短路阻抗方程^[7]为:

$$\begin{cases} \frac{1}{X_{500}} + \frac{1}{X_T + X_{220}} = 572.9 \\ \frac{1}{X_{220}} + \frac{1}{X_T + X_{500}} = 190.5 \end{cases} \quad (3)$$

2 分区受电能力分析

分区电网负荷由500 kV主变和接入220 kV分区电网的地方电源共同供电。分区电网受电能力取决于500 kV变电站的配置情况、分区电网的电源容量、分区电网结构和500 kV变电站的开关遮断容量。

一般来说,同一变电站的变压器以不超过4台为宜。假设同一变电站只配置同类型的变压器,分区受电能力考虑500 kV主变 $N-1$ 后其余主变过载1.3倍,分区内发电机备用容量10%^[9],则有:

$$\text{分区受电能力} = \text{单台主变容量} \times (N-1) \times 1.3 + \text{220 kV侧装机容量} \times 90\% \quad (4)$$

由分区电网装机容量,结合式(2)可算得220 kV系统等效短路阻抗 X_{220} 。由最优极限短路阻抗方程式(3),可进一步确定500 kV系统等效短路阻抗 X_{500} 和500 kV变电站等值阻抗 X_T 。在此基础上,分区电网变电站的配置可表示为:

$$N = \frac{X_T \times 100 / S_T}{X_T} \quad (5)$$

其中: N 为变电站的变压器台数, X_T 为单台变压器的短路阻抗百分比, S_T 为单台变压器容量。

由式 (4) 即可求出短路电流约束下的分区电网规模。

3 限制短路电流的措施

限制短路电流的措施有很多, 但考虑到电网的实际情况和运行经验, 通常采取高低压电磁环网解环, 变电站母线分段接线, 采用高阻抗变压器等改善电网结构的方法, 使各电源到变电站之间保持合理的转移阻抗, 从而达到控制短路电流, 提高受电能力的目的。

3.1 高低压电磁环网解环

两相邻分区通过 500 kV 和 220 kV 线路互联构成高低压电磁环网。500 kV/220 kV 电磁环网, 其综合阻抗小, 短路容量大, 容易使 220 kV 系统的短路电流超过断路器的额定断流容量, 给系统造成安全隐患。通过电磁环网的解环可实现电力系统的分区运行, 分区使单个系统容量减小, 从而降低短路电流水平。如图 3 所示, 电磁环网解环后, 分区 A 变电站的 220 kV 母线短路时, 由于分区 B 的电源不再提供短路电流, 因而分区 A 的短路电流水平降低, 分区受电能力相应提高。

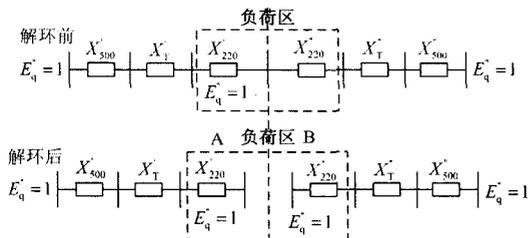


图 3 电磁环网分区示意图

Fig.3 Sketch of electromagnetic loop circuit districting

3.2 变电站母线分段接线

变电站母线分段接线限制短路电流水平的效果非常明显。如图 4 所示, 变电站 220 kV 侧母线分段运行, 分区电网内的电源分散接到母线 A 和 B 上。当母线 A 短路时, 接到母线 B 上的电源在母线 A 上的短路电流很小, 从而达到控制短路电流水平的目的, 进一步可提高分区电网受电能力。某些情况下, 正常运行时, 为了保证系统运行的可靠性, 保持电网调度的灵活性, 母线仍需并列运行。解决此矛盾的办法是在母线断路器上装设自动快速解列装置, 在故障时将母联断路器快速断开。

3.3 采用高阻抗变压器

500 kV 变电站 220 kV 侧母线的短路电流由 500

kV 主变和接入 220 kV 分区电网的电源共同提供。

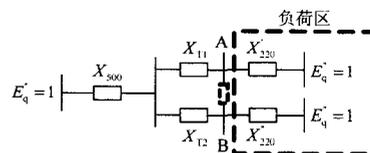


图 4 变电站母线分段示意图

Fig.4 Sketch of bus subsection in substation

在 500 kV 主变容量一定的情况下, 其高中侧阻抗越大, 500 kV 主变提供的短路电流越小, 留给接入分区电网电源的短路电流空间也越大, 进而可接入分区电网的电源容量越大, 分区供电能力越强。采用高阻抗变压器可降低系统短路电流, 但也会增加网损, 降低系统稳定性, 新建 500 kV 站主变压器高中侧阻抗百分比宜选取 20% 左右^[10]。

4 实例分析

2008 年山东电网冬大运行方式下, 济南电网结构如图 5 所示。济南电网通过长清、济南站各两台主变与主网相联。济南站分区和长清站分区互联, 共同构成了图 1 (b) 所示的模式 2 结构。分区各电源母线到变电站 220 kV 侧母线的转移阻抗如表 1 所示。

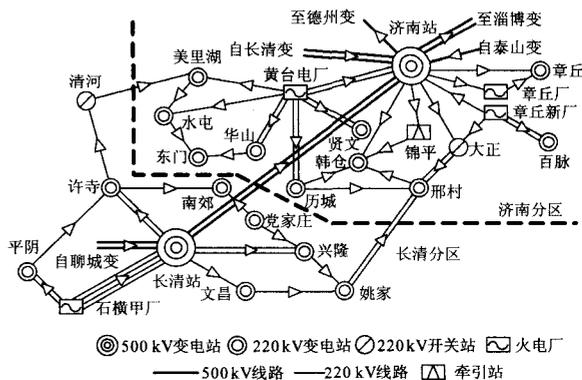


图 5 济南地区电网结构

Fig.5 Structure of Jinan power grid

表 1 电源到变电站的转移阻抗

Tab.1 Transfer impedance from power supply to substation

电源名	电源到济南站	电源到长清站
鲁石横甲 220	0.028 3	0.016 4
鲁章丘厂 220	0.001	0.01
鲁章丘厂新 220	0.013 5	0.026 8
鲁黄台厂 220	0.011 1	0.021 4
分区感应电动机	0.037 7	0.070 4

4.1 模式2 接线方式下短路电流计算

采用中国电科院开发的“电力系统分析综合程序(PSASP)”计算短路电流。济南站220 kV侧母线三相短路电流为49.23 kA,已经非常接近220 kV断路器的额定开断电流50 kA。根据图2中的短路电流计算模型,结合式(1)和式(2),可求出济南站220 kV侧母线三相短路电流。济南地区不同分区电源容量情况下,济南站220 kV母线三相短路电流曲线如图6所示。基于本文短路电流模型的计算结果与PSASP短路电流计算结果相比,差别较小。

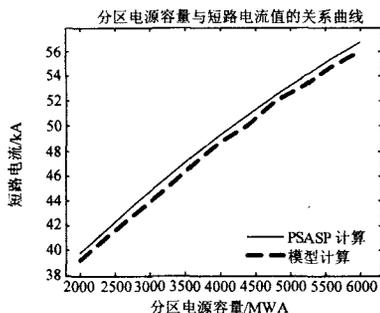


图6 分区电源容量与短路电流的关系曲线

Fig.6 Relation curve of district power supply capability and short circuit current

4.2 模式1 接线方式下短路电流计算

考虑清美线、邢姚双线打开,实现济南地区济南站和长清站的高低电压磁环网解环。济南站分区电网为单个500 kV站独立成片的模式1结构。电磁环网解环前后济南站短路电流计算值如表2所示。由表2可知,电磁环网解环后,济南站220 kV母线三相短路电流降低了5.83 kA,电磁环网解环可有效地限制短路电流水平。

表2 解环前后济南站短路电流计算值

Tab.2 Calculation of short circuit current in Jinan substation before and after electromagnetic loop circuit districting

变电站	解环前		解环后
	PSASP 计算/kA	PSASP 计算/kA	模型计算/kA
鲁济南站 220	49.23	43.40	42.65

4.3 变电站母线分段接线短路电流计算

模式2 接线方式下,考虑济南站220 kV 母线分段运行控制短路电流。鲁济南站220—鲁黄台厂220 双回线路接到新增母线鲁济南站220 新上,与鲁济南站3号变压器相连,从而实现鲁济南站220 母线与鲁济南站220 新母线分段运行。母线分段前后济南站短路电流计算值如表3所示。由表3可知,济南站220 kV 母线分段后,济南站220 kV 母线三相

短路电流降低了13.75 kA,变电站母线分段限制短路电流水平的效果是很明显的。

表3 分段前后济南站短路电流计算值

Tab.3 Calculation of short circuit current in Jinan substation before and after bus subsection

变电站	母线分段前		母线分段后
	PSASP 计算/kA	PSASP 计算/kA	模型计算/kA
鲁济南站 220	49.23	35.48	34.80

4.4 采用高阻抗变压器的短路电流计算

模式2 接线方式下,考虑提高500 kV 站主变压器高中侧阻抗对220 kV 侧母线短路电流的影响。济南站主变压器不同高中侧阻抗情况下,220 kV 侧母线短路电流曲线如图7所示。可见,在500 kV 主变容量一定的情况下,高中侧阻抗越大,500 kV 主变提供的短路电流越小,变电站220 kV 母线短路电流也就越小。基于本文短路电流模型的计算曲线与PSASP 短路电流计算曲线相比,差别较小。

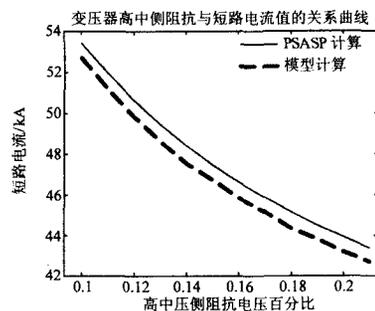


图7 变压器高中侧阻抗与短路电流关系曲线

Fig.7 Relation curve of transformer high-medium impedance and short circuit current

4.5 济南电网分区受电能力分析

模式1 接线方式下,济南站单台变压器容量为750 MVA,短路阻抗百分比为12%时,分区电网受电能力与电源容量的关系曲线如图8所示。

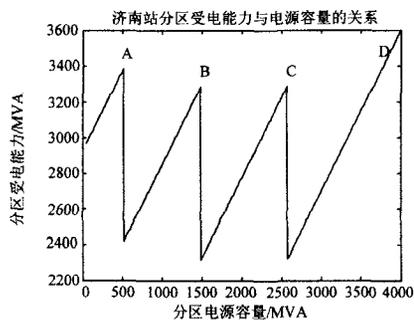


图8 分区受电能力与电源容量的关系曲线

Fig.8 Relation curve of district power receiving capability and power supply capability

其中, A 点分区电源 517 MVA, 可配变压器 4 台, 受电能力 3 390 MVA; B 点分区电源 1 485 MVA, 可配变压器 3 台, 受电能力 3 287 MVA; C 点分区电源 2 581 MVA, 可配变压器 2 台, 受电能力 3 298 MVA; D 点分区电源 3 872 MVA, 可配变压器 1 台, 受电能力 3 485 MVA。

分区电网受电能力随区内电源容量的增长呈分段增长趋势, 但在 A、B、C 三点急剧下降。随着分区电源容量的增大, 220 kV 系统等效短路阻抗 X_{220} 相应减小, 由最优极限短路阻抗方程可知, 变电站等值阻抗 X_T 增大, 从而导致变压器台数减少。由于 500 kV 主变容量的减少, 分区受电能力急剧下降。在 D 点之后, 500 kV 站变压器台数降为 0, 分区电网受电能力仅取决于分区电源容量, 分区电网孤岛运行, 显然与实际不符, 因而仅考虑曲线在 D 点以前的情况。

表 4 分区电网配置情况

Tab.4 Configuration of district power grid

曲线分段	A 点前	AB	BC	C 点后
变电站配置/台	4	3	2	1
电源配置/MVA	510	1 480	2 570	3 555

当分区受电能力为 3 200 MVA 时, 分区电网变电站配置及电源配置如表 4 所示。分区电网需要根据自身的定位(如分区是以 500 kV 变电站为主要电源, 还是以 220 kV 侧的装机为主要电源), 确定变电站配置及电源配置, 进而协调处理 500 kV 侧与 220 kV 侧的短路容量问题。

考虑改善电网结构对提高分区受电能力的影响, 分区电网受电能力与电源容量的关系曲线如图 9 所示。图中 (a), 济南站单台变压器容量为 750 MVA, 短路阻抗百分比为 12% 时, 模式 1 较模式 2 的分区受电能力要大, 电磁环网解环可在一定程度上提高分区电网受电能力。图中 (b), 模式 1 接线方式下, 济南站单台变压器容量为 750 MVA, 短路阻抗百分比为 12% 时, 变电站母线接线分段后较分段前的分区受电能力有较大幅度的提升。图中 (c), 模式 1 接线方式下, 济南站单台变压器容量为 750 MVA 时, 短路阻抗百分比 20% 较 12% 的分区受电能力要大, 采用高阻抗变压器可有效提高分区电网受电能力。由图 9 可知, 变压器母线分段接线提高分区电网受电能力的效果最为显著。

5 结论

本文针对 220 kV 分区电网的两种典型结构模式, 利用基本电路理论建立了短路电流模型和受电

能力计算方法, 并将其应用于 2008 年济南电网的短路电流限制分析和受电能力计算, 得出以下结论:

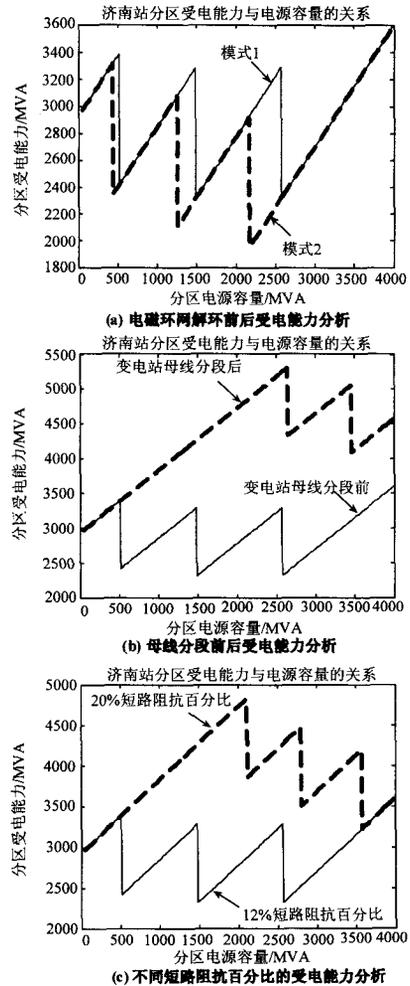


图 9 分区受电能力与电源容量的比较曲线

Fig.9 Comparison curve of district power receiving capability and power supply capability

(1) 短路电流模型考虑了分区网络拓扑随装机容量容量的增大而加强的实际情况, 考虑了负荷中感应电动机对短路电流的影响, 比较结果表明其具有较好的适用性。

(2) 高低压电磁环网解环, 变电站母线分段接线, 采用高阻抗变压器等改善电网结构的方法, 可有效控制系统短路电流水平, 提高分区电网受电能力。

参考文献

[1] 王梅义, 吴竟昌, 蒙定中. 大电网系统技术(第 2 版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
WANG Mei-yi, WU Jing-chang, MENG Ding-zhong. Big

- Grid System Technique, 2nd ed [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [2] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术, 2007, 31 (10): 42-45.
YUAN Juan, LIU Wen-ying, DONG Ming-qi, et al. Application of Measures Limiting Short Circuit Currents in Northwest China Power Grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10):42-45.
- [3] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29 (2): 78-83.
RUAN Qian-tu. Present Situation of Short Circuit Current Control in Shanghai Power Grid and Countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(2):78-83.
- [4] Sarmiento H G, Castellanos R, Pampin G, et al. An Example in Controlling Short Circuit Levels in A Large Metropolitan Area[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. 2003.13-17.
- [5] 黄娟娟, 郑英芬. 特高压网架对华中电网短路电流水平的影响分析及限流措施[J]. 中国电力, 2007, 40 (3): 49-52.
HUANG Juan-juan, ZHENG Ying-fen. Analysis of Effect of 1000kV UHV Grid on the Short Circuit Current of the Central China Grid and Research on Limiting Measures of Short Circuit Current[J]. Electric Power, 2007, 40(3):49-52.
- [6] Maliszewski R M, Pasternack B M. A Statistical Techniques for Projecting Future Short Circuit Level of EHV System[J]. CIGRE Symposium, 1995, (100):8.
- [7] 徐贤. 220 kV 电网短路电流预测的新方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (16): 103-106.
XU Xian. A Novel Method for Predicting Short-circuit Current of 220kV Sub-transmission Network and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16):103-106.
- [8] 张进, 贺仁睦, 王鹏, 等. 送端感应电动机负荷无功特性对送出极限的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (4): 24-27.
ZHANG Jin, HE Ren-mu, WANG Peng, et al. Influence of Reactive Power Characteristic of Sending-end Induction Motor on System Sending Limitation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4):24-27.
- [9] 张啸虎, 朱忠列, 祝瑞金. 220kV 分区电网的合理配置研究[J]. 华东电力, 2006, 34 (5): 36-40.
ZHANG Xiao-hu, ZHU Zhong-lie, ZHU Rui-jin. Reasonable Configuration of 220kV District Grids[J]. East China Electric Power, 2006, 34(5):36-40.
- [10] 祁万春, 奚巍民, 张谦, 等. 应用 500kV 高阻抗变压器提高 220kV 片区供电能力[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (14): 96-98.
QI Wan-chun, XI Wei-min, ZHANG Qian, et al. Improving Power Supply Capability of 220kV District Grid Using 500kV Main Transformer with High Short Circuit Impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14):96-98.

收稿日期: 2008-12-02; 修回日期: 2009-03-20

作者简介:

杨冬 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yangdong@mail.sdu.edu.cn

刘玉田 (1964-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制及人工智能在电力系统中的应用;

牛新生 (1962-), 男, 高级工程师, 主要从事电网规划和电网计算分析方面的工作。

(上接第 61 页 continued from page 61)

- [5] 高笑, 王步云, 龙燕. 电力谐波及其对电能计量的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2004, 2: 53-55, 73.
GAO Xiao, WANG Bu-yun, LONG Yan. Electric Harmonic and Its Influence on Electric Energy Measurement[J]. Journal of Logistics Engineering College, 2004, 2: 53-55, 73.
- [6] 褚大华. 谐波与电能计量[J]. 电测与仪表, 2007, 8: 5-9.
CHU Da-hua. Harmonic and Energy Measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 8: 5-9.
- [7] 王思源, 彭新瑞. 配电网中一种新的谐波计量技术[J]. 电工技术, 2008, 5: 24-26, 63.
WANG Si-yuan, PENG Xin-rui. New Technology for Harmonics Measuring of Distribution Network[J]. Electrotechnical Journal, 2008, 5: 24-26, 63.
- [8] 向铁元, 张鹏, 温先卫. 感应式电表谐波计量误差软件[J]. 中国仪器仪表, 2004,(6): 3-5.
XIANG Tie-yuan, ZHANG Peng, WEN Xian-wei. The Software for Harmonic Metering Error of Induction[J]. Watt-hour Based on BP Neural Network, 2004,(6): 3-5.
- [9] 唐福顺, 禹仲明. 基于电力谐波的电能计量分析[J]. 湖南电力, 2002, 22(5): 13-15.
TANG Fu-shun, YU Zhong-ming. Energy Measurement analysis Based on Electric Harmonics[J]. Hunan Electric Power, 2002, 22(5): 13-15.

收稿日期: 2008-11-24

作者简介:

张勇军 (1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统无功优化和电压稳定、电力系统可靠性与规划等研究; E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

石辉 (1986-), 男, 硕士生, 主要从事电力系统运行分析与控制研究。