

水轮发电机定子短路故障形式分析及其算法设计

毛俊喜, 张 哲, 尹项根, 夏勇军

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Short-Circuit Fault Modality Analysis of Hydraulic Generator Stators and Design of Corresponding Algorithm

MAO Jun-xi, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, XIA Yong-jun

(College of Electrical and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Due to the serious damage caused by internal faults in hydraulic generator stators, it is particularly necessary to research effective configuration scheme of main protection for them, and the optimized design of main protection configuration scheme is based on the fault modality analysis of internal short-circuit that may occur within the generator. At present multi-branched wave winding structure or lap winding structure are adopted in high capacity hydraulic generators, the authors analyze the features of all fault modality that may occur within the generators with these two kinds of stator windings in detail and design a versatile algorithm that can generate respective fault sets. The applications of the designed algorithm in the stator fault modality analysis of hydraulic generators (with wave winding) located in left bank of the Three Gorges power station as well as hydraulic generators (with lap winding) located in extension project of Zhexi power station are presented.

KEY WORDS: hydraulic generator; stator winding structure; fault modality analysis; algorithm design; main protection

摘要: 水轮发电机定子内部故障破坏性强, 研究有效的主保护配置方案尤为必要, 而主保护配置方案的优化设计又以发电机可能发生的内部短路故障形式分析为基础。目前大型水轮发电机定子绕组普遍采用多分支双层波绕或叠绕的结构, 文章针对这 2 种绕组结构, 详细分析了发电机内部可能发生的所有故障形式特点, 设计了可形成各自故障集的通用算法, 并介绍了该算法在三峡左岸 Alstom 电机(波绕)和柘溪电站扩建工程发电机(叠绕)定子故障形式分析中的应用。

关键词: 水轮发电机; 定子绕组结构; 故障形式分析; 算法设计; 主保护

0 引言

近年来随着我国能源需求不断增长, 一批大型

水电站陆续开工建设, 单机容量也越来越大。对这些造价昂贵、容量巨大的大型水轮发电机配置有效的主保护, 对发电机本身乃至整个电网的安全稳定运行都具有重要意义^[1]。由于大型机组采用多分支结构, 不同的主保护配置方案其保护性能存在明显差异, 因此, 一般需通过对发电机内部故障进行全面的仿真计算来确定其主保护的优化配置方案, 对此国内外科研工作者进行了大量的研究工作^[2-16]。大型发电机定子绕组结构复杂, 故障形式多样, 短路故障总数可能近万种, 因此, 如何根据绕组结构形式, 采用计算机技术自动形成内部短路故障集是主保护方案研究中需要解决的关键技术问题。文献[17]针对三峡左岸机组的具体结构, 对其定子绕组故障形式进行了分析。本文结合大型机组目前广泛采用的双层波绕组和叠绕组的结构形式, 对 2 种绕组形式下内部短路故障的通用分析算法进行了研究, 并利用 VC++ 开发了通用的内部短路故障形式分析软件。

1 波绕组和叠绕组结构及其故障形式特点

对于波绕和叠绕 2 种绕组结构, 分别以三峡左岸 Alstom 电机(ABB)和柘溪扩建工程电机为例进行说明, 其部分绕组结构形式分别如图 1 和图 2 所示。图中实线、虚线分别表示所处位置为上层边、下层边, 数字编号为所处定子铁心槽号。三峡左岸 Alstom 机组额定功率为 700 MW, 总槽数为 540, 每相 5 分支并联, 每分支 36 匝线圈。位于湖南的柘溪电站扩建工程采用的是天津阿尔斯通设备有限公司生产的叠绕组机组, 额定功率为 250 MW, 定子总槽数为 528, 每相 4 分支并联, 每分支 44 匝线圈。

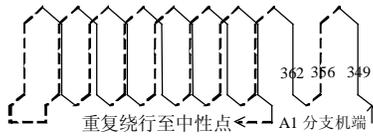


图1 三峡左岸电站 Alstom 发电机

Fig. 1 Alstom hydraulic generator in the left bank of the Three Gorges power station

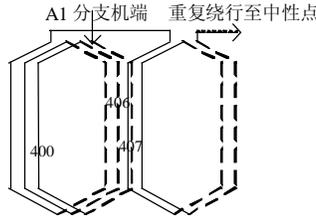


图2 柘溪扩建工程发电机

Fig. 2 Hydraulic generator in the Zhexi power station's extension project

定子绕组内部短路故障主要考虑槽内和端部因绝缘损坏或其它原因造成的线棒短路故障, 下文分别简称为槽内故障和端部故障。

为便于故障形式分析, 引用电机学中第一节距 y_1 和第二节距 y_2 的概念, 2 种节距均以槽数计, 且取正值。例如图 1 中 $y_1=356-349=7$, $y_2=362-356=6$; 图 2 中 $y_1=407-400=7$, $y_2=406-400=6$ 。由于绕组绕线方式采用了带回绕的方式, 为便于理论分析并易于理解理论分析所得结果的实际意义, 需对绕组正方向作出规定^[18]: 正槽号线圈为正绕(从线圈首端接入、末端接出), 负槽号线圈为反绕(从线圈末端接入、首端接出); 并定义线圈首端所处槽号超前线圈末端所处槽号 y_1 槽。

2 定子绕组可能发生的短路故障形式分析

对于槽内故障, 由定义可知, 发生短路故障的线棒为处于同一定子槽内的 2 根线棒。无论是波绕组还是叠绕组, 槽内可能发生的短路故障数目等于定子总槽数, 记为 Z 。对于端部故障, 由于波绕组和叠绕组绕线方式的差异, 下面分别予以讨论。

首先分析波绕组。如图 3(a)所示, 以单匝线圈(由位于第 n 槽的上层线棒和位于第 $n+y_1$ 槽的下层线棒构成)的上层线棒(图中实线)为例, 该线棒的上端连接线与位于第 $(n+1) \sim (n+y_1-1)$ 槽中的下层线棒的上端连接线相交叠可能会发生短路故障, 共计 (y_1-1) 种; 该线棒的下端连接线与位于第 $(n-1) \sim (n-y_2+1)$ 槽中的下层线棒的下端连接线相交叠可能会发生短路故障, 共计 (y_2-1) 种。累计可得该线棒可能发生的端部短路故障共计 (y_1+y_2-2) 种, 故整个波绕组定子绕组端部短路故障共计 $Z(y_1+y_2-2)$ 种。

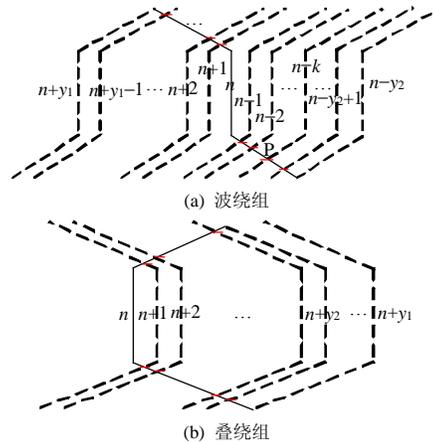


图3 波绕组和叠绕组可能的端部故障位置

Fig. 3 Probable fault position on the end region of the wave winding and the lap winding

下面分析叠绕组端部短路故障。如图 3(b)所示, 同样以单匝线圈(由位于第 n 槽的上层线棒和位于第 $n+y_1$ 槽的下层线棒构成)的上层线棒为例进行说明。由图可知, 该线棒的上端连接线与位于第 $(n+1) \sim (n+y_2-1)$ 槽中的下层线棒的上端连接线相交叠可能会发生短路故障, 共计 (y_2-1) 种; 该线棒的下端连接线与位于第 $(n+1) \sim (n+y_1-1)$ 槽中的下层线棒的下端连接线相交叠可能会发生短路故障, 共计 (y_1-1) 种。累计可得 (y_1+y_2-2) 种, 数目与波绕组相同, 即整个叠绕组端部短路故障数目为 $Z(y_1+y_2-2)$ 种。

根据前面的分析可得到波绕组和叠绕组故障数目计算的通用公式, 无论是波绕组还是叠绕组均有: 短路故障总数=槽内短路故障数+端部短路故障数 $=Z+Z(y_1-1+y_2-1)=Z(y_1+y_2-1)$ 。

在发电机主保护方案的优化设计中, 短路回路的匝数对保护性能评价有重要影响, 特别是发电机内部绕组短路时, 有很大一部分小匝数短路, 因此, 为保证分析结果的正确性, 精确的故障回路匝数计算十分重要。在短路回路匝数计算中, 不同故障点的位置需采用不同的计算方法。以柘溪扩建工程电机 A 相第 1 分支自机端开始的前 3 匝线圈为例来说明这一问题, 如图 4 所示。电机运转时, 近似考虑上、下端连接线不切割磁力线, 忽略其电动势, 因此第 1 匝末端与第 3 匝首端(图 4 中 M 点)发生短路时, 在故障形式归结时应归结为 A 相第 1 分支第 1 匝末端(或第 2 匝首端)与 A 相第 1 分支第 2 匝末端(或第 3 匝首端)短路, 而不可简单地归结为第 1 匝与第 3 匝短路; 故障的实际回路匝数为 $2-1=1$ 匝, 而非 $3-1=2$ 匝。另外, 第 1 匝半匝处与第 3 匝半匝处(图 4 中 N 点)可能发生短路, 其短路回路匝数为

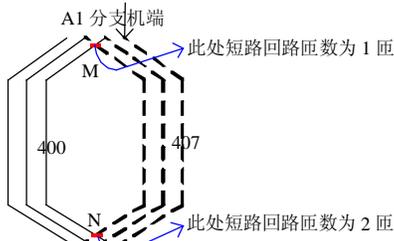


图 4 柘溪扩建工程发电机部分绕组
Fig. 4 Partial stator winding of the Zhexi power station's extension project

2 匝，与前面的 1 匝差不同。因此在计算故障集时应按实际可能发生的位置精确记录到对应匝位上。对于波绕组同样需注意这些问题。

下面以图 3(a)中波绕组 P 处故障为例分析一般性的故障形式定位问题。假定第 n 槽的上层线棒所在线圈 S_1 位于其所在分支 B_1 的第 c_1 匝，第 $n-k$ 槽 ($0 < k < y_2$) 的下层线棒所在线圈 S_2 位于其所在分支 B_2 的第 c_2 匝。根据前面的正向规定，在对绕组作出正向规定后，若 S_1 、 S_2 均为正向线圈(S_1 为正向线圈表示正绕，即从首端(位于第 n 槽上层)接入，从末端(位于第 $n+y_1$ 槽的下层)接出)，则 P 处故障形式应归结为分支 B_1 第 c_1-1 匝末端与分支 B_2 第 c_2 匝末端故障；若 S_1 、 S_2 均为负向线圈，则应归结为分支 B_1 第 c_1 匝末端与分支 B_2 第 c_2-1 匝末端故障；若 S_1 为正向、 S_2 为负向，则应归结为分支 B_1 第 c_1-1 匝末端与分支 B_2 第 c_2-1 匝末端故障；若 S_1 为负向、 S_2 为正向，则应归结为分支 B_1 第 c_1 匝末端与分支 B_2 第 c_2 匝末端故障。对于叠绕组端部故障中的上端部故障形式同样需要作上述分析处理。

由于发电机主保护(诸如完全纵差保护、不完全纵差保护、单元件零序横差保护和完全裂相横差保护等)的动作率与短路故障形式有很大关系，因此，笔者在故障形式分析中根据各种槽内和端部短路故障的具体位置，进一步将其按同相同支短路、同相异支短路和异相短路进行了类型划分。后文应用实例中对此有详细说明。

3 算法设计与软件流程

基于以上分析，笔者采用 Windows 平台下的 VC++6.0 开发了水轮发电机定子故障形式分析软件，软件流程如图 5 所示。其中 $U[P_i][N_j][L_k]$ 中存放的是 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈的上层线棒所处槽号($0 \leq P_i < 3$, $0 \leq N_j < N$, $0 \leq L_k < L$)。作为上层线棒的 $U[P_i][N_j][L_k]$ 与作为下层线棒的

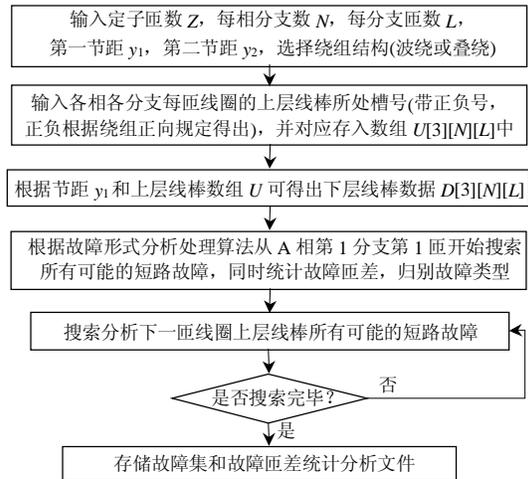


图 5 软件流程
Fig. 5 Flow chart of the software

$D[P_i][N_j][L_k]$ 构成 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈。

故障形式分析处理算法主要分 2 步：

(1) 当搜索至第 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈上层线棒时，根据前面的分析，位于第 $(|U[P_i][N_j][L_k]|+1) \sim (|U[P_i][N_j][L_k]|+y_1-1)$ (记为 n ，当 $n > Z$ 时 n 自身减去 Z ，即 $n=n-Z$) 槽中的下层线棒所处线圈的中部与 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈中部可能发生短路故障，故障位置为端部，从 D 中搜寻出绝对值与对应 n 相等的项 $D[P_{si}][N_{sj}][L_{sk}]$ ，即 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈中部可能与 P_{si+1} 相第 N_{sj+1} 分支第 L_{sk+1} 个线圈中部发生短路。根据相、分支信息将上述信息分类(同相同支、同相异支、异相)写入端部故障文件存储，并计算所属类型短路回路匝数。

(2) 判定发电机定子绕组绕制方式，若为叠绕，位于第 $(|U[P_i][N_j][L_k]|+1) \sim (|U[P_i][N_j][L_k]|+y_2-1)$ (记为 n ，当 $n > Z$ 时 n 自身减去 Z ，即 $n=n-Z$) 槽中的下层线棒所处线圈的端部与 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈端部(至于是首端还是末端，依据该匝线圈正负相做定位处理)可能发生短路故障，故障位置为端部；位于第 $|U[P_i][N_j][L_k]|$ 槽中的下层线棒所处线圈与 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈的上层线棒可能发生短路故障，故障位置为槽内。从 D 中搜寻出绝对值与对应 n 相等的项 $D[P_{si}][N_{sj}][L_{sk}]$ ，即 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈端部可能与 P_{si+1} 相第 N_{sj+1} 分支第 L_{sk+1} 个线圈端部发生短路。若为波绕，位于第 $(|U[P_i][N_j][L_k]|-1) \sim (|U[P_i][N_j][L_k]|-y_2+1)$ (记为 n ，当 $n < 0$ 时 n 自身加上 Z ，即

$n=n+Z$ 槽中的下层线棒所处线圈的端部与 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈端部可能发生短路故障, 故障位置为端部; 位于第 $|U[P_i][N_j][L_k]|$ 槽中的下层线棒所处线圈与 P_{i+1} 相第 N_{j+1} 分支第 L_{k+1} 个线圈的上层线棒可能发生短路故障, 故障位置为槽内。将上述故障形式信息分类写入文件存储, 并按故障所属类型统计对应短路回路匝数。

4 应用实例

该软件已应用于瀑布沟电站(叠绕)和湖南柘溪扩建工程的发电机保护分析中。下面分别以三峡左岸 Alstom 5 分支机组和柘溪扩建工程 4 分支发电机为例介绍其应用情况。

三峡 Alstom 机组定子第一节距为 7(槽), 第二节距为 6(槽)。运行故障形式分析软件后, 输入结构参数和节距即可得到: 槽内可能故障数目为 540 种, 其中同相同支 420 种(占槽内故障的 77.8%), 同相异支 60 种(占 11.1%), 异相 60 种(占 11.1%); 端部可能故障数目为 $540 \times (7-1+6-1) = 5940$ 种, 其中同相同支为 930 种(占端部故障的 15.6%), 同相异支为 330 种(占 5.6%), 异相为 4680 种(占 78.8%)。其同相短路故障回路匝数统计分析见表 1。

表 1 Alstom 电机短路回路匝数统计
Tab. 1 Statistics of turn-difference of Alstom hydraulic generator

| 匝差 | 槽内故障 | | 端部故障 | |
|------|------|------|------|------|
| | 同相同支 | 同相异支 | 同相同支 | 同相异支 |
| 0 匝 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 匝 | 105 | 0 | 0 | 0 |
| 2 匝 | 0 | 0 | 105 | 0 |
| 3 匝 | 105 | 0 | 0 | 0 |
| 4 匝 | 0 | 0 | 105 | 0 |
| 5 匝 | 105 | 0 | 0 | 0 |
| 6 匝 | 0 | 0 | 105 | 0 |
| 7 匝 | 105 | 0 | 225 | 0 |
| ≥8 匝 | 0 | 60 | 390 | 330 |

柘溪电站扩建工程采用的电机定子第一节距为 7(槽), 第二节距为 6(槽)。执行程序输入结构参数后可得: 槽内可能故障数目为 528 种, 其中同相同支 268 种(占 50.8%), 同相异支 20 种(占 3.8%), 异相 240 种(占 45.4%); 端部可能故障数目为 $528 \times (7-1+6-1) = 5808$ 种, 其中同相同支 800 种(占 13.8%), 同相异支 16 种(占 0.3%), 异相 4992 种(占 85.9%)。其短路回路匝数统计分析见表 2。

在具体工程实际中, 只要输入定子绕组结构的相应形式参数, 即可由通用软件方便地得到内部短路故障集及其特性情况。

表 2 柘溪扩建工程电机短路回路匝数统计

Tab. 2 Statistics of turn-difference of hydraulic generator in Zhexi power station's extension project

| 匝差 | 槽内故障 | | 端部故障 | |
|------|------|------|------|------|
| | 同相同支 | 同相异支 | 同相同支 | 同相异支 |
| 0 匝 | 0 | 2 | 0 | 16 |
| 1 匝 | 0 | 18 | 480 | 0 |
| 2 匝 | 134 | 0 | 144 | 0 |
| 3 匝 | 46 | 0 | 176 | 0 |
| 4 匝 | 88 | 0 | 0 | 0 |
| ≥5 匝 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5 结论

本文对目前国内大型水轮发电机普遍采用的双层波绕组和双层叠绕组绕组内部可能发生的故障形式和特点进行了研究, 提出了通用的故障形式分析算法并开发了相应的分析软件。可根据发电机的实际绕组结构自动生成用于发电机内部故障仿真计算的故障集, 极大地方便了发电机主保护优化设计工作。同时, 也有助于全面了解发电机实际可能发生的各种内部短路故障情况, 对机组的运行维护和结构完善具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 何仰赞. 同步电机的内部短路计算[J]. 华中工学院学报, 1979, (1): 140-151.
- [3] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [4] 王维俭, 刘俊宏, 蒙宁海. 大型水轮发电机不完全差动保护的分析计算[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(3): 42-47.
Wang Weijian, Liu Junhong, Meng Ninghai. Calculation analysis for domestic differential protection of large generators[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(3): 42-47(in Chinese).
- [5] 林鹤云, 屠黎明, 胡敏强. 大型水轮发电机回路参数的有限元计算[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 258-261.
Lin Heyun, Tu Liming, Hu Minqiang. Calculation of loop parameters of large hydro generators with finite element method[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4): 258-261(in Chinese).
- [6] 胡敏强, 屠黎明, 林鹤云, 等. 水轮发电机定子绕组内部故障稳态电量仿真及其规律探讨[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 3-8.
Hu Minqiang, Tu Liming, Lin Heyun, et al. Simulation and investigation of the internal armature winding fault of the hydro-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 3-8(in Chinese).
- [7] 屠黎明, 陆于平, 胡敏强, 等. 水轮发电机定子绕组内部故障电气量计算与保护方案分析系统[J]. 电网技术, 1999, 23(8): 39-43.
Tu Liming, Lu Yuping, Hu Minqiang, et al. System for steady-state performance calculation and protection scheme analysis of internal armature winding fault in hydro-generator[J]. Power System Technology, 1999, 23(8): 39-43(in Chinese).

- [8] 王为国, 尹项根, 刘世明, 等. 故障发电机定子绕组主电感系数的简化计算[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 51-53.
Wang Weiguo, Yin Xianggen, Liu Shiming, et al. A simplified method for the calculation of fault generator stator winding's mainductance[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 51-53(in Chinese).
- [9] 邵能灵, 尹项根. 凸极发电机定子绕组故障瞬变过程仿真及其规律探讨[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 61-65.
Tai Nengling, Yin Xianggen. Simulation and laws of the internal stator winding faults of salient generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 61-65(in Chinese).
- [10] 刘世明, 王为国, 尹项根, 等. 同步电机电感矩阵分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 89-95.
Liu Shiming, Wang Weiguo, Yin Xianggen, et al. Analysis method of synchronous machines inductance matrices[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 89-95(in Chinese).
- [11] 孙宇光, 王祥珩, 桂林, 等. 场路耦合计算同步发电机定子绕组内部故障的暂态过程[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 136-141.
Sun Yuguang, Wang Xiangheng, Gui Lin, et al. Transient calculation of stator's internal faults in synchronous generator using coupled with multi-loop method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 136-141(in Chinese).
- [12] 桂林, 王祥珩, 孙宇光, 等. 大型发电机主保护配置方案的优化设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(1): 141-144.
Gui Lin, Wang Xiangheng, Sun Yuguang, et al. Optimum design of main protection configuration scheme for large generators[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Tech), 2005, 45(1): 141-144(in Chinese).
- [13] 田庆, 林湘宁, 刘沛. 高压发电机内部故障仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 26-31.
Tian Qing, Lin Xiangning, Liu Pei. Studies on the internal fault simulation of powerformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 26-31(in Chinese).
- [14] 万书亭, 李和明, 许兆凤, 等. 定子绕组匝间短路对发电机定转子径向振动特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 157-161.
Wan Shuting, Li Heming, Xu Zhaofeng, et al. Analysis of generator vibration characteristic on stator winding inter-turn short circuit fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 157-161(in Chinese).
- [15] 夏长亮, 方红伟, 金雪峰, 等. 同步发电机定子绕组内部故障数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 124-129.
Xia Changliang, Fang Hongwei, Jin Xuefeng, et al. Numerical analysis of stator winding faults in synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 124-129(in Chinese).
- [16] 许伯强, 王祥珩, 毕大强, 等. 多回路-有限元耦合数学模型的同步发电机定子单相接地故障保护方案校验方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 84-89.
Xu Boqiang, Wang Xiangheng, Bi Daqiang, et al. Protection scheme checkout of stator ground fault in synchronous generators based on MLM-FEM coupled mathematical model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 84-89(in Chinese).
- [17] 黄磊, 尹项根, 夏勇军. 一种特大型水轮发电机定子故障形式分析及其搜索算法设计[J]. 继电器, 2005, 33(15): 6-9.
Huang Lei, Yin Xianggen, Xia Yongjun. Stator fault modality analysis and searching algorithm designing of a particularly giant hydraulic generator[J]. Relay, 2005, 33(15): 6-9(in Chinese).
- [18] 许实章. 新型电机绕组——理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

收稿日期: 2006-05-17。

作者简介:

毛俊喜(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护, E-mail: brooksmao@gmail.com;

张哲(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与控制;

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护及安全稳定控制、电力系统分析;

夏勇军(1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

(责任编辑 沈杰)

(上接第51页 continued from page 51)

- [14] 张文, 刘玉田. 自适应粒子群优化算法及其在无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 19-24.
Zhang Wen, Liu Yutian. Adaptive particle swarm optimization method and its application in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 19-24(in Chinese).
- [15] 刘明波, 李健, 武捷. 求解无功优化的非线性同伦内点法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 1-7.
Liu Mingbo, Li Jian, Wu Jie. Nonlinear homogeneous interior-point method for reactive-power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 1-7(in Chinese).
- [16] 朱春明. 电力系统动态无功优化问题的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2003.
- [17] 倪炜, 单渊达. 具有优化路径的遗传算法应用于电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 40-44.
Ni Wei, Shan Yuanda. A refined genetic algorithm with optimalsearching path used in power system reactive power optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 40-44(in Chinese).

收稿日期: 2006-10-16。

作者简介:

何佳(1981—), 男, 汉族, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中的应用, E-mail: hustboyhejia@163.com;

吴耀武(1963—), 男, 汉族, 副教授, 从事电力系统及其自动化方面的科研与教学工作, 研究方向为电力系统运行分析与规划;

娄素华(1974—), 女, 满族, 讲师, 从事电力系统运行分析与规划及电力系统继电保护研究;

熊信良(1945—), 男, 汉族, 教授, 从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作, 研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中应用。

(责任编辑 马晓华)