

等效瞬时电感算法在Y- Δ 接线变压器中的应用

金恩淑, 刘丽丽, 杨明芳, 陈韬

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 对于Y- Δ 接线的三相变压器, 等效瞬时电感算法会受到环流的影响, 但目前尚没有确切的求取环流的算法, 从而影响等效瞬时电感的准确计算进而影响保护的可靠动作。对此, 提出一种新的算法, 能够准确地计算出 Δ 侧绕组的环流, 从而既能准确地计算出等效瞬时电感, 使其不受 Δ 侧绕组内部环流的影响, 同时又不会使差动保护存在死区, 能够使保护灵敏可靠动作。EMTP 仿真结果表明: 该算法得到的等效瞬时电感能够准确、有效地识别励磁涌流与内部故障, 不需要再测量 Δ 侧绕组的相电流, 也无需改变CT配置方案, 并且适用于超高压和220 kV以下的电力变压器, 具有工程实际应用价值。

关键词: 等效瞬时电感; 励磁涌流; 变压器差动保护; Y- Δ 接线的三相变压器; 环流

Application of equivalent instantaneous inductance algorithm to the Y/ Δ three-phase transformer

JIN En-shu, LIU Li-li, YANG Ming-fang, CHEN Tao

(Electrical Engineering College, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: To the Y/ Δ three-phase transformer, the algorithm based on equivalent instantaneous inductance will be influenced by circulation. At present, there is no an accurate method to compute this circulation. Therefore, the accuracy of calculation of equivalent instantaneous inductance is influenced and the reliability of act of protection is also influenced. In this case, a new method is proposed in this paper. It can accurately compute circulation of delta winding, not only can compute the equivalent instantaneous inductance accurately to prevent it from the influence of circulation, but also can avoid the existence of "dead zone" and can act sensitively for the differential protection. The results of EMTP simulation show that the equivalent instantaneous inductance got by this algorithm can identify the inrush current and internal fault current. The measurement of phase current of delta winding is not needed and it is not necessary to change the configuration plan of current transformer. At the same time, this algorithm is also applied to the power transformer which has ultrahigh voltage or voltage under 220kV and has a practical value in the project.

Key words: equivalent instantaneous inductance; inrush current; transformer differential protection; Y/ Δ three-phase transformer; circulation

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)20-0005-05

0 引言

单相变压器等效瞬时电感的计算公式^[1-7]原则上可以推广到三相变压器, 但三相变压器接线复杂, 尤其是对Y/ Δ 接线的三相变压器, 在构成变压器纵差保护时, 由于变压器两侧电流相位不一致, 必须采取一定的转角方式来进行差流平衡调整^[2]。常用的有两种转角方式: 一种是将 Δ 侧线电流两两相减得到不包含环流分量的 Δ 侧绕组电流, 再与Y侧(假设中性点接地)相应的去除零序分量影响的线电流做差, 得到差动电流, 即所谓的“角变星”方式; 另一种是将Y侧线电流两两相减, 再与 Δ 侧对应的线

电流做差, 得到差动电流, 即所谓的“星变角”方式。但这两种转角方式用于差动保护有很多弊端, 文献[8~11]对此做了详细的分析, 认为转角变换后得到的差电流并不能反映真实的励磁电流的变化, 因此不能利用相位补偿后的电流直接计算励磁电感。文献[2]分析认为, 当变压器从 Δ 侧空载合闸时, Δ 侧绕组内具有数值较大的环流分量, 如果忽略它的影响, 势必会影响到励磁电感的正确计算, 这也是不能采用转角方式来计算励磁电感的原因。

文献[5]分析了变压器 Δ 侧绕组内部环流的性质及其对等效瞬时电感计算的影响, 认为等效瞬时电感受 Δ 侧环流影响大, 必须计及环流的影响才能

保证等效瞬态电感的计算精度。然而△侧绕组内部环流难以通过线电流计算得到,文献[2]提出的方案是将CT接于每相绕组内部来测量△侧相电流,由此构成的变压器差动保护虽能保护匝间短路和相间故障(故障点在CT内侧),但对于变压器△侧CT外侧(在绕组内部)的相间故障,因其存在保护“死区”,致使该差动保护拒动,这是该方案的一个严重缺陷。对于500 kV 电力变压器,由于采用3个独立的单相变压器构成三相变压器,可配置绕组CT,故能使用等效瞬态电感方法识别励磁涌流。而对于大量的220 kV及以下电压等级电力变压器而言,由于采用三相三柱式或三相五柱式的绕制型式,无法配置绕组CT,该方案不容易实现^[8]。

本文提出的方法能够准确地计算环流,进而求出△形侧相电流。保证了等效瞬态电感的准确计算,使其不受环流影响,又不会使差动保护存在“死区”,不必改变现有的CT配置方案,EMTP 仿真验证了结果的准确性。

1 单相变压器等效瞬态电感的计算

变压器磁化曲线具有非线性特性,正常运行时,工作点位于磁化曲线的线性段,此时励磁电感较大,空载合闸产生励磁涌流时,变压器铁心交替工作在磁化曲线的线性段和饱和段上,相应的励磁电感将经历一个由大变小,再由小变大的变化过程。当变压器绕组发生匝间短路时,相当于在励磁支路并联一个短路的第3绕组,此时的励磁电感比正常运行时的数值要小,而且基本不变。根据上述特征,在引入电压量后,可利用计算出的励磁电感大小和变化规律来识别励磁涌流和内部故障^[4]。

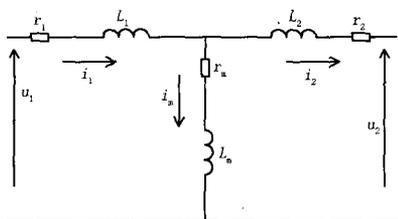


图 1 单相变压器的等值T型电路

Fig.1 Type T equivalent circuit of single phase transformer

$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + r_m i_m + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

其中: L_1 、 r_1 、 i_1 、 u_1 分别为原边绕组漏感电阻、电流和端电压; r_m 、 i_m 分别为励磁电阻与励磁电流; ψ 为原副边的互感磁链。由

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt} = L_m \frac{di_m}{dt} \quad (2)$$

可以定义等效瞬态励磁电感为

$$L_m = \frac{d\psi}{di_m} \quad (3)$$

文献[1]中定义了等效瞬态电感的概念:从原边绕组端口看进去的瞬态电感。当变压器空载合闸产生涌流时,等效瞬态电感为瞬态励磁电感与原边漏电感之和;当变压器内部发生匝间故障时,等效瞬态电感由两部分构成,其中一部分为瞬态励磁电感与短路绕组漏感的并联,另一部分为原边绕组的漏感,二者之和即为等效瞬态电感。空载合闸发生涌流与内部故障时变压器具有如下统一方程式:

$$u = ri + L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

式中: u 为变压器原边端口电压, r 为等效电阻, L 为等效瞬态电感, i 为变压器原副边电流差,即差流。采用在 k 时刻和 $k+1$ 时刻的电流和电压的瞬值得到两个不相关的方程式,联立求解

$$L = 2T \frac{u^{(k)} \times i^{(k+1)} - u^{(k+1)} \times i^{(k)}}{i^{(k)2} + i^{(k+1)2} - i^{(k-1)} \times i^{(k+1)} - i^{(k)} \times i^{(k+2)}} \quad (5)$$

其中: T 为采样周期。式中小括号内的 k 表示第 k 个采样点的值, T 表示采样间隔。 i 即 i_d ,为变压器原副边绕组电流之差。

2 Y/△接线三相变压器等效瞬态电感的计算

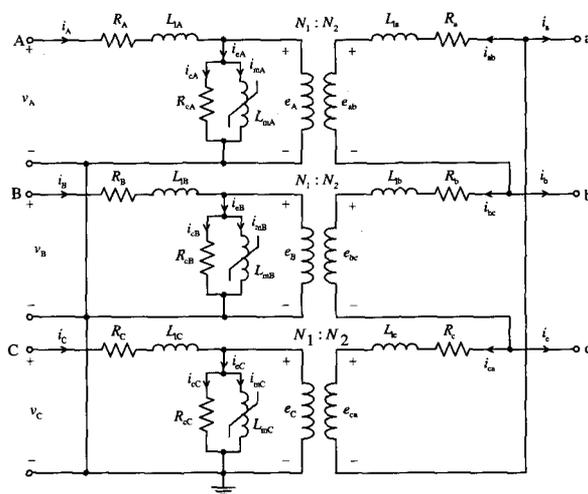


图 2 Y/△接线变压器等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of Y/△ transformer

图 2 给出了一个 Y/△接线三相变压器的等值电

路。根据式(5), 要想求出每一相的等效瞬时电感, 必须求出每一相的高压侧与低压侧相电流之差。但对于 Y/Δ 接线三相变压器 Δ 侧的相电流是无法测量的。这就给等效瞬时电感的求取造成了困难。

下面我们给出了环流的求取方法:

假设:

$$R_A \approx R_B \approx R_C \approx R_1, \quad L_{1A} \approx L_{1B} \approx L_{1C} \approx L_{11}$$

$$R_{ab} \approx R_{bc} \approx R_{ca} \approx R_2, \quad L_{1ab} \approx L_{1bc} \approx L_{1ca} \approx L_{12}$$

如果没有内部故障, 一次和二次侧电压可以表示为:

$$v_A = R_1 i_A + L_{11} \frac{di_A}{dt} + e_A \quad (6)$$

$$v_B = R_1 i_B + L_{11} \frac{di_B}{dt} + e_B \quad (7)$$

$$v_C = R_1 i_C + L_{11} \frac{di_C}{dt} + e_C \quad (8)$$

$$v_{ab} = R_2 i_{ab} + L_{12} \frac{di_{ab}}{dt} + e_{ab} \quad (9)$$

$$v_{bc} = R_2 i_{bc} + L_{12} \frac{di_{bc}}{dt} + e_{bc} \quad (10)$$

$$v_{ca} = R_2 i_{ca} + L_{12} \frac{di_{ca}}{dt} + e_{ca} \quad (11)$$

相电流被分解为非环流和环流两部分。

$$i_{ab} = i_{pa} + i_{\Delta}, \quad i_{bc} = i_{pb} + i_{\Delta}, \quad i_{ca} = i_{pc} + i_{\Delta} \quad (12)$$

非环流分量计算如下:

$$i_{pa} = \frac{i_b - i_a}{3}, \quad i_{pb} = \frac{i_c - i_b}{3}, \quad i_{pc} = \frac{i_a - i_c}{3} \quad (13)$$

重新调整式(6)~(8):

$$e_A = v_A - R_1 i_A - L_{11} \frac{di_A}{dt} \quad (14)$$

$$e_B = v_B - R_1 i_B - L_{11} \frac{di_B}{dt} \quad (15)$$

$$e_C = v_C - R_1 i_C - L_{11} \frac{di_C}{dt} \quad (16)$$

式(9)~(11)两边相加得:

$$e_{ab} + e_{bc} + e_{ca} = L_{12} \frac{d(3i_{\Delta})}{dt} + R_2(3i_{\Delta}) \quad (17)$$

式(17)左边可以通过 e_A 、 e_B 、 e_C 和变比得到, 因此环流 i_{Δ} 可以通过式(17)求得。把式(13)和(17)代入式(12), 可以求出 Δ 侧的各相相电流。然后根据式(18)可以求出各相差流, 最后根据式(5)等效瞬时电感可求。

$$i_{dA} = i_A - i_{ab}, \quad i_{dB} = i_B - i_{bc}, \quad i_{dC} = i_C - i_{ca} \quad (18)$$

3 EMTP仿真结果及DSP试验

3.1 EMTP 仿真结果

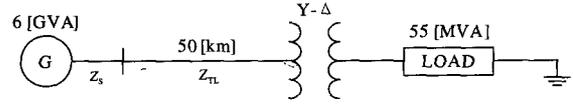


图3 仿真系统图

Fig.3 Simulation system chart

变压器的电压电流由电磁暂态仿真程序 EMTP 产生。图 3 为仿真系统的单线图, 变压器额定容量为 55 MVA, 额定电压为: $U_1/U_2=154 \text{ kV}/13 \text{ kV}$, 内部故障采用的是文献[12]中的模型。铁心的磁滞特性仿效的是 EMTP 中的 96 型元件, 饱和点为(40 A, 334 Vs)。采样频率为每周期 64 个采样点, 采用 Butterworth 二阶低通滤波器进行滤波, 截止频率为 960 Hz。

图 4 至图 7 分别为变压器励磁涌流及内部故障时等效瞬时电感的计算情况, 各种情况下分别给出了一次侧相电流 i_A , 二次侧相电流 i_{ab} , 高压侧与低压侧相电流之差 i_{dA} 以及等效瞬时电感 L_A 。

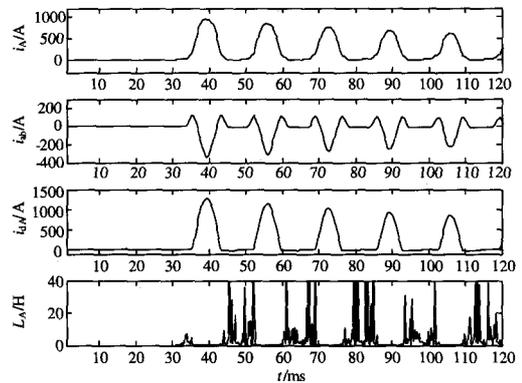


图4 励磁涌流时的等效瞬时电感(0%剩磁)

Fig.4 Equivalent instantaneous inductance when inrush current occurring

图 4 为变压器空载合闸时等效瞬时电感的计算情况, 合闸角度为 0 度, 剩磁为 0% B_m , 环流的计算误差小于 0.2%。由式(17)可知, 环流的大小主要取决于二次侧主电动势, 空载合闸时, 铁心中的主磁通大幅增大, 使铁心饱和, 形成励磁涌流, 与此同时, 二次侧的主电动势也大幅度地增加, 使得环流急剧上升, 当磁通达到最大值时, 环流也达到最

大值，其幅值可达到 2000 A，随着磁通的衰减，环流也随之下降。由图可以看出由本文方法计算出来的等效瞬时电感是经历一个明显的由大到小，再由小变大的交替过程，说明变压器铁心是交替工作在磁化曲线的线性段和饱和段。

图 5 为空载合闸（剩磁为 80%B_m）时等效瞬时电感的计算情况，合闸角度为 0°，等效瞬时电感的变化情况与零剩磁时相近，也是经历一个明显的由大到小，再由小变大的交替过程，说明本文算法可以不受剩磁影响。

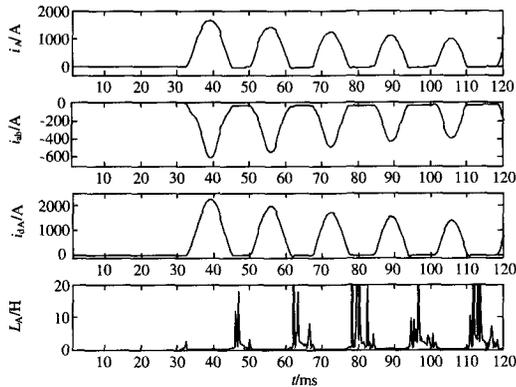


图 5 励磁涌流时的等效瞬时电感(80%剩磁)
Fig.5 Equivalent instantaneous inductance when inrush current occurring

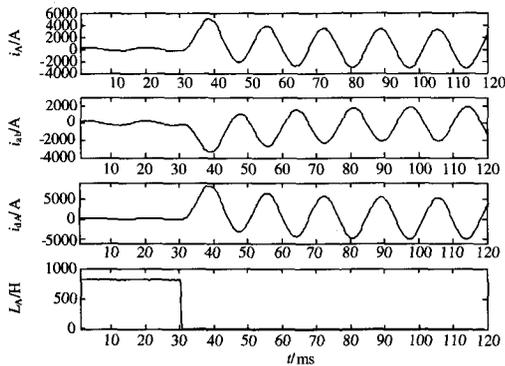


图 6 内部故障情况下的等效瞬时电感
(单相接地短路)

Fig.6 Equivalent instantaneous inductance got by circulation when internal fault occurring (single-phase-to-ground-fault)

图 6 为变压器发生 A 相单相接地短路时等效瞬时电感的计算情况，正常情况下等效瞬时电感为一个较大的常数，说明变压器工作在线性段。短路后，相当于在励磁支路并联一个短路的第 3 绕组，此时的励磁电感比正常运行时的数值要小得多，而且基本不变。

图 7 为距中性点 30%到 40%处发生匝间短路时

的等效瞬时电感。由图可见，短路电流比单相接地时明显减小，但等效瞬时电感在短路后立即变为一个极小的值，由此可以判别故障。

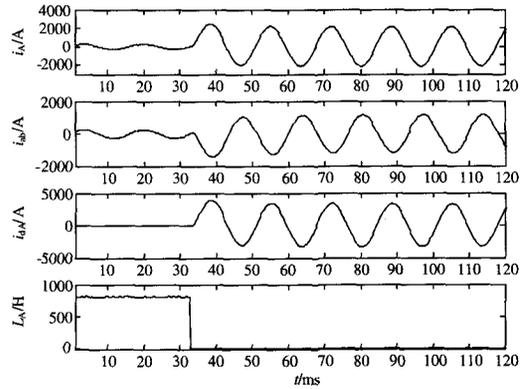


图 7 内部故障情况下的等效瞬时电感（匝间短路）

Fig.7 Equivalent instantaneous inductance got by circulation when internal fault occurring (turn-to-turn-fault)

3. 2 DSP 试验及其结果

本文应用 TMS320C6701 数字信号处理硬件平台对该方法予以验证。由 PCL-727 D/A 转换器将 EMTP 产生的数字信号转换成模拟信号，再经由 Butterworth 二阶低通滤波器进行滤波，滤波频率为 1920 Hz，最后由 14 位的 A/D 转换器将模拟信号转换为每周期 64 个采样点的数字信号。

图 8、图 9 分别对应 0° 空载合闸（80%剩磁）和内部故障（单相接地）情况下的试验结果。与 EMTP 仿真结果相近，验证了本文的算法。图 9 对应于正常状态的部分是一个忽大忽小的值，这是由 DSP 试验的误差造成的，但并不影响保护的正确动作。

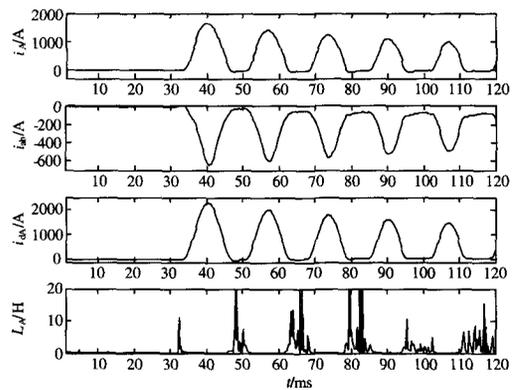


图 8 励磁涌流时的等效瞬时电感(80%剩磁)

Fig.8 Equivalent instantaneous inductance when inrush current occurring

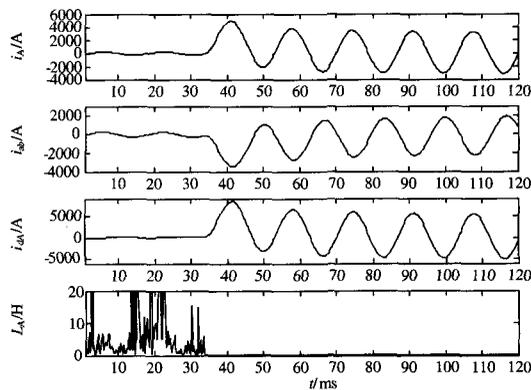


图9 内部故障情况下的等效瞬时电感
(单相接地短路)

Fig. 9 Equivalent instantaneous inductance got by circulation when internal fault occurring (single-phase-to-ground-fault)

4 结论

对于 Y/△接线的三相变压器, 等效瞬时电感算法会受到环流的影响, 但目前尚没有确切的求取环流的算法, 从而影响保护的可靠动作。对此, 本文提出一种新的算法, 能够准确地计算出△侧绕组的环流, 解决了 Y/△接线方式的三相变压器受环流影响导致电感无法求取的问题。EMTP 仿真表明, 本文算法能够准确计算出 Y/△接线三相变压器△侧相电流, 无需改变现有的 CT 接线, 能够正确计算变压器的各相等效瞬时电感, 有效地识别变压器励磁涌流与内部故障, 同时又不会使差动保护存在死区, 使保护灵敏可靠的动作, 具有很好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 葛宝明, 苏鹏声, 王祥珩, 等. 基于瞬时励磁电感频率特性判别变压器励磁涌流[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 35-40.
GE Bao-ming, SU Peng-sheng, WANG Xiang-heng, et al. Distinguish Inrush Currents for Transformers Using Frequency Characteristic of Instantaneous Excitation Inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 35-40.
- [2] 郑涛, 刘万顺, 谷君, 等. 三相变压器等效瞬时电感的计算分析及 CT 配置新方案[J]. 继电器, 2006, 34(16): 58-60.
ZHENG Tao, LIU Wan-shun, GU Jun, et al. Analysis of the Calculation of Equivalent Instantaneous Inductance in Three-phase Transformer and a New CT's Configuration[J]. Relay, 2006, 34(16): 1-6.
- [3] 焦邵麟, 肖仕武, 刘万顺. 基于等效瞬时励磁电感时

域特性判别变压器励磁涌流[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(11): 68-71.

JIAO Shao-lin, XIAO Shi-wu, LIU Wan-shun. The Discriminant of Inrush Current of Transformer Based on the Time-domain Property the Equivalent Instantaneous Magnetic Inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11): 68-71.

- [4] 葛宝明, 于学海, 王祥珩, 等. 基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 44-48.

GE Bao-ming, YU Xue-hai, WANG Xiang-heng, et al. A Novel Equivalent Instantaneous Inductance Based Algorithm Used to Distinguish Inrush Currents for Transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 44-48.

- [5] 郑涛. 变压器数字仿真和数字式主保护新原理的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.

ZHENG Tao. Research on Digital Simulation and Novel Digital Main Protective Principles of Transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.

- [6] 郑涛, 刘万顺, 庄恒建, 等. 用归一化等效瞬时电感分布特性识别励磁涌流的新算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 47-53.

ZHENG Tao, LIU Wan-shun, ZHUANG Heng-jian, et al. A New Algorithm Based on the Distribution of the Normalized Equivalent Instantaneous Inductance for Discrimination of Inrush[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 47-53.

- [7] 庄衡建. 变压器新型主保护原理的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.

ZHUANG Heng-jian. The Study of Principle of the New Main Transformer Protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003.

- [8] 林湘宁, 徐雨舟, 刘沛. 相电流比例差动判据与线电流比例差动判据的比较[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 21-25.

LIN Xiang-ning, XU Yu-zhou, LIU Pei. Comparison Between Phase Current and Line Current Percentage Differential Criteria[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 21-25.

- [9] 邓祥力, 刘世明. 变压器保护两种转角方式的比较[J]. 继电器, 2004, 32(16): 20-24.

DENG Xiang-li, LIU Shi-ming. Comparison of Two Current Compensation Methods in Transformer Protection[J]. Relay, 2004, 32(16): 20-24.

- [10] 丁网林, 骆健, 刘强. 零序电流对数字变压器差动保护 Y, d 矢量变换的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 56-58.

(下转第 14 页 continued on page 14)

粒子群算法的收敛性仍然是困扰该方法的重要因素,需要进一步的探讨研究,提高收敛速度。

参考文献

- [1] 伍力, 吴捷, 钟丹虹. 多目标优化改进遗传算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 45-48.
WU Li, WU Jie, ZHONG Dan-hong. Application of Improved Genetic Alogorithm In Multi-Objective Power Network Optimization Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(12): 45-48.
- [2] Potts J C, Giddens T D, Yandav S B. The Development and Evaluation of an Improved Genetic Algorithm Based on Migration and Artificial Selection[J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics, 1994,24(1):73-86.
- [3] 陈海炎, 陈金富. 基于改进粒子群优化算法的输电系统多阶段协调规划[J]. 继电器, 2005,33(23): 36-40.
CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu. Particle Swarm Optimization for Transmission Systems Multi-Stage and Coordinated Planning[J]. Relay, 2005,33(23): 36-40.
- [4] 金义雄, 程浩忠, 严健勇, 等. 基于并行协同粒子群算法的多阶段电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(5): 49-53.
JIN Yi-xiong, CHENG Hao-zhong, YAN Jian-yong, et al. Parallel Cooperative Particle Swarm Optimization Based Multistage Transmission Network Planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 49-53.
- [5] 王秀丽, 李淑慧, 陈皓勇, 等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 11-15.
WANG Xiu-li, LI Shu-hui, CHEN Hao-yong, et al. Multi-objective and Multi-district Transmission Planning Based on NSGA-II and Cooperative Co-evolutionary Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 11-15.
- [6] Li X. Better Spread and Convergence: Particle Swarm Multiobjective Optimization Using the Maximin Fitness Function[A]. In: GECCO(2004) LNCS(3102)[C]. 2004: 117-128.
- [7] 徐佳, 李绍军, 钱锋. 基于最大最小适应度函数的多目标粒子群算法[J]. 计算机与数字工程, 2006,34(8): 31-34.
XU Jia, LI Shao-jun, QIAN Feng. A New Particle Swarm Optimization for Multiobjective Problem[J]. Computer & Digital Engineering, 2006,34(8): 31-34.
- [8] 徐佳, 李绍军, 钱锋. 多目标粒子群优化算法在集群目标靶场效能优化问题上的应用[A]. 第六届全球智能控制与自动化大会[C]. 2006.
- [9] Hillis D W. Co-evolving Parasites Improve Simulated Evolution as an Optimization Procedure[A]. In: Artificial Life II[C]. California: 1991.313-314.
- [10] Husbands P, Mill F. Simulated Co-Evolution as the Mechanism for Emergent Planning and Scheduling[A]. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms[C]. California: 1991. 264-270.
- [11] Potter M A, De Jong K A. Cooperative Coevolution: an Architecture for Evolving Coadapted Subcomponents[J]. Evolutionary Computation, 2000,8(1): 1-29.
- [12] 童陆园, 王小波, 王仲鸿. 输电网的中长期动态整数规划—临界可行结构匹配法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1989, 1(1): 12-13.
TONG Lu-yuan, WANG Xiao-bo, WANG Zhong-hong. Long and Middle term Dynamic Integral Power Transmission Network Planning—Critical Feasible Structural Matching Method[J]. Proceedings of CUS-EPSA, 1989, 1(1): 12-13.
- [13] 王秀丽, 王锡凡. 遗传算法在输电系统中的应用[J]. 西安交通大学学报, 1995,29(8):1-9.
WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Application of Genetic Algorithm in Transit Electricity System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995,29(8):1-9.
- 收稿日期: 2008-01-10; 修回日期: 2008-05-08
作者简介:
何井龙 (1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力市场及其软件开发研究; E-mail: xthj1149@163.com
杨红梅 (1971-), 女, 大专, 从事继电保护工作。
-
- (上接第9页 continued from page 9)
- DING Wang-lin, LUO Jian, LIU Qiang. Effect of Zero-sequence Current on Star-delta Vector Transform of Digital Transformer Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 56-58.
- [11] 毕大强, 王祥珩, 杨恢宏, 等. 变压器差动保护中电流相位补偿方式的分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(18): 33-37.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, YANG Hui-hong, et al. Analysis on the Current Phase Compensation Methods in Differential Protection for Transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 33-37.
- [12] Bastard P, Bertrand P, Meunier M. A Transformer Model for Winding Fault Studies[J]. IEEE Trans on PWRD, 1994,9(2):690-699.
- 收稿日期: 2008-01-04; 修回日期: 2008-02-25
作者简介:
金恩淑 (1975-), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力变压器保护的研究;
刘丽丽 (1981-), 女, 研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: allison8192003@yahoo.com.cn