

外加电源式定子接地保护影响因素的分析

侯有韬¹, 张丽丽²

(1. 云南省电力调度中心, 云南 昆明 650011; 2 华北电力大学, 河北 保定 071003)

摘要: 以外加 20 Hz 交流电源为例, 考虑外加电源从中性点注入的方式, 分析了在不同中性点接地方式下 (经配电变压器高阻接地方式和经消弧线圈接地方式) 外加电源内阻对电流判据构成的保护的影响; 详细分析了变压器漏抗和消弧线圈漏感对导纳判据构成的保护的影响, 并对测量误差进行了对比分析。

关键词: 外加电源; 内阻; 定子; 接地保护

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)12-0027-05

0 引言

随着发电机单机容量的逐渐增大, 其对地电容也在增大, 保护难度相应增大, 注入式定子接地保护的应用将更为广泛。因此, 有必要对它的各种动作特性进行分析, 以便对其做客观评价, 并进行相应的改进。

1 外加 20 Hz 交流电源的定子接地保护

考虑电源从中性点注入, 保护原理如图 1 所示。

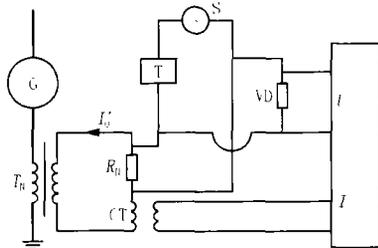


图 1 中性点经配电变压器高阻接地

Fig 1 Neutral grounded through high resistance of distributing transformer

图 1、2 为不同中性点接地方式下的外加电源式定子接地保护示意图。图 3(a)、(b) 分别为图 1、2 的等值电路。图中, $3C_g$ 为发电机三相对地电容 (已折合到副方); R_K 为定子单相接地过渡电阻; R_N 为接地变压器二次侧电阻; L_N 为发电机中性点消弧线圈电感; $R_i = 8 \Omega$ 为外加电源内阻。

1.1 中性点经配电变压器接地方式

正常运行时, 发电机三相对地电容有少量的低频零序电流。发生单相接地故障后, 低频零序电流骤增。以该电流作为动作电流的保护动作。这就是电流判据的外加电源式定子接地保护方案。这在忽略外加电源内阻的影响时是合适的。实际上, 由于

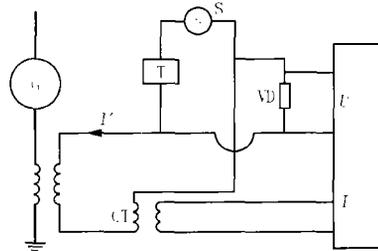


图 2 中性点经消弧线圈接地

Fig 2 Neutral grounded through extinction coil

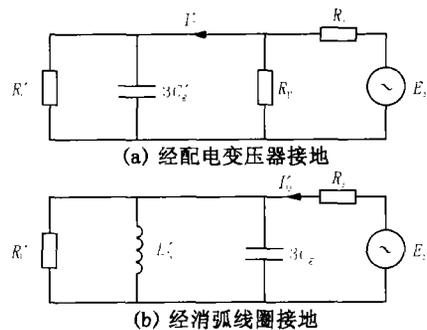


图 3 中性点注入电源的等值电路

Fig 3 Equivalent circuit for neutral injected source

电源和滤波器 T 是有内阻的, 因此应该考虑外加电源内阻的影响。当考虑外加电源内阻的影响后, 上述电流判据的灵敏度将会受到影响。下面分别分析考虑电源内阻和不计电源内阻两种情况下的灵敏度。

(a) 外加电源内阻的影响

要使保护能够正确动作, 故障后的动作电流 I_0 应该大于正常运行情况下的电流 I_0 。即

$$|I_0| > |I_0| \quad (1)$$

由图 3(a) 可知,

$$I_0 = E_i / \left(\frac{Z_0 \cdot R_N}{Z_0 + R_N} + R_i \right) \cdot \frac{R_N}{R_N + Z_0} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{E_i}{R_i + R_N // (-jX_c)} \cdot \frac{R_N}{R_N - jX_c} \quad (3)$$

其中

$$Z_0 = R_K // (-jX_c), \quad X_c = \frac{1}{3 C_g}$$

对于 20 Hz 外加电源来说, $\omega = 2\pi f = 125.6637$, 将式 (2)、(3) 代入式 (1) 中, 最后推导出

$$(R_K^2 + X_c^2) \cdot (2R_0 R_K - X_c^2) < 0$$

因为 $(R_K^2 + X_c^2) > 0$, 所以推出过渡电阻 R_K 应满足

$$R_K < \frac{X_c^2}{2R_0}$$

将其换算到一次侧的值为

$$R_K < \frac{X_c^2}{2n^2 R_0} \quad (4)$$

其中

$$R_0 = \frac{R_N \cdot R_i}{R_N + R_i}, \quad n \text{ 为配电变压器变比。}$$

算例发电机: 发电机额定电压 20 kV, 每相绕组对地电容为 $1.81 \mu\text{F}$, 机端附加电容为 $0.2 \mu\text{F}$, 中性点接地变压器的变比 23.1, 配电变压器二次侧接地电阻 1.1, 外加电源内阻 8。这样由式 (4) 计算出的过渡电阻值为 2081.06。即当接地电阻小于 2081.06 时, 保护动作电流比正常运行的电流值大, 但当该电阻值大于 2081.06 时, 保护动作电流将小于正常运行时的电流值, 进入死区。

将电源内阻 R_i 忽略后, I_0 和 I_0 的表达式分别为

$$I_0 = \frac{E_i}{R_K // (-jX_c)} \quad (5)$$

$$I_0 = \frac{E_i}{-jX_c} \quad (6)$$

式 (5) 和式 (6) 满足式 (1) 的关系。也就是说, 无论接地过渡电阻多大, 其故障后的动作电流都大于正常运行时的电流, 都能正确动作, 理论上没有死区。

以算例发电机为例, 对考虑电源内阻和不计电源内阻两种情况下的电流判据的灵敏度进行比较, 如图 4、5 所示。

从图中可以看出, 计及电源内阻后的保护灵敏度将低于忽略该内阻后的保护灵敏度。在考虑一定的安全系数后, 不仅存在高电阻接地的动作死区, 还存在正常运行电流与故障电流曲线交点附近的一段死区。灵敏度大大降低了。

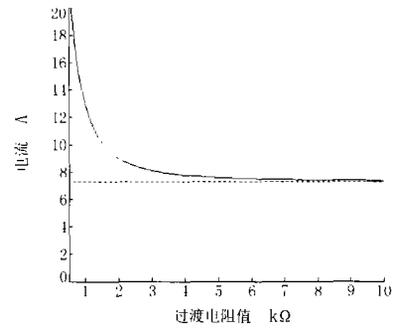


图 4 忽略电源内阻

Fig 4 Ignoring the inherent resistance

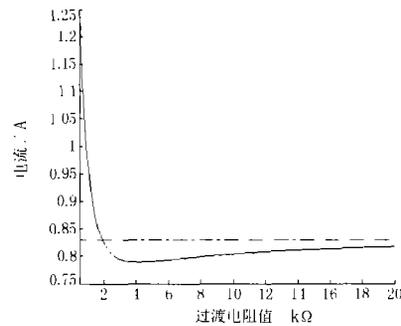


图 5 计及电源内阻

Fig 5 Considering the inherent resistance

(b) 配电变压器参数的影响

以上分析外加电源式单相接地保护的等效电路时, 认为配电变压器的漏阻抗很小可以忽略不计, 激磁阻抗很大可以认为开路, 因此得到了图 3 的等效电路。实际上, 变压器的激磁阻抗并非无穷大, 漏抗也产生压降, 忽略它们将会对计算接地电阻的准确度有影响。根据单相变压器的 T 型和 π 型等效电路, 图 6 和图 7 分别给出了相应的外加电源定子单相接地保护的等效电路。

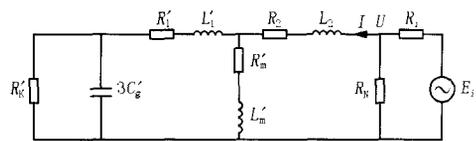


图 6 考虑漏阻抗和激磁阻抗的 T 型等效电路

Fig 6 T-type equivalent circuit considering the leakage impedance and exciting impedance

下面以 π 型等效电路为例进行分析。图中: R_1 为折算到二次侧的一次侧绕组电阻; L_1 为折算到二次侧的一次侧绕组漏感; R_2 为二次侧绕组电阻; L_2 为二次侧绕组漏感; R_m 为折算到二次侧的激磁电阻; L_m 为折算到二次侧的激磁电感。

算例发电机为: 发电机额定电压 20 kV, 每相绕

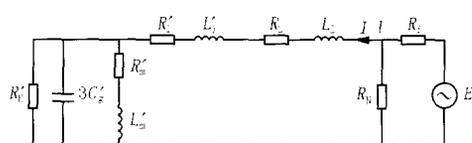


图7 考虑漏阻抗和激磁阻抗的型等效电路

Fig 7 -type equivalent circuit considering the leakage impedance and exciting impedance

组对地电容为 $1.81 \mu\text{F}$,机端附加电容为 $0.2 \mu\text{F}$,中性点接地变压器的变比 23:1,二次侧接地电阻 1.1Ω ,外加电源内阻 8Ω 。

按发生定子一点接地时流经配电变压器的最大故障电流(在机端发生金属性接地) I_E 计算接地变压器的容量 S_N 。

$$I_E = U_N / (\sqrt{3}n^2 R_N) = 19.67 \text{ A}$$

考虑 1.1 倍裕度时接地变压器的容量

$$S_N = 1.1 U_N I_E \sqrt{3} = 249.8 \text{ kVA}$$

取接地变压器短时电流过载能力 5 倍,则最终取接地变压器的容量为 50 kVA。

根据《电力工程师应用手册》中的规定,可以计算出折算到二次侧的变压器等效电路参数值(假设一、二次侧绕组的参数相等):

$$R = R_1 + R_2 = 0.062$$

$$L = L_1 + L_2 = 4.46 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$R_m = 28.56$$

$$L_m = 0.548 \text{ H}$$

根据图 7 中的型等效电路图,在不考虑变压器激磁电流(激磁回路)的影响下,忽略漏抗压降时二次侧计算的定子对地导纳为

$$Y = I/U$$

计入漏抗压降时二次侧计算的定子对地导纳为

$$Y = \frac{I}{U - I(R + jL)}$$

折算到一次侧的接地过渡电阻值为

$$R_K = n^2 \frac{1}{\text{Re}(Y)}$$

图 8 中给出了不同接地电阻,在不计激磁阻抗的条件下,比较忽略与计入变压器漏抗压降时一次侧接地电阻的计算误差对比。曲线 1 为计入变压器漏阻抗时接地电阻的计算误差曲线;曲线 2 为忽略变压器漏阻抗时接地电阻的计算误差曲线。

从趋势上看,曲线 1 较为平缓,在 $10 \text{ k}\Omega$ 的接地电阻下,计算误差仍在 10% 以下;而且随着接地电阻的变化,误差的变化均匀;曲线 2 则呈现出奇异的变化。当接地电阻小于 $1.5 \text{ k}\Omega$ (大约)时,计算的相

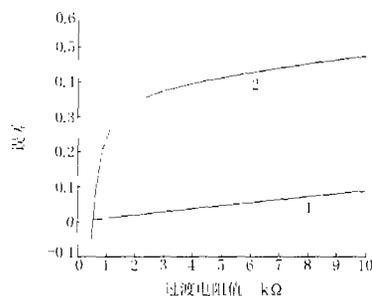


图8 接地变压器参数的影响

Fig 8 Influence of grounding transformer parameters

对误差随着接地过渡电阻的增大而显著增大。当接地过渡电阻大于 $1.5 \text{ k}\Omega$ 时,计算误差的变化趋势与曲线 1 相似,但是误差值已经很大了。从此可以看出,接地变压器的漏抗压降对接地电阻的测量和计算结果影响较大,通过计入漏阻抗的影响,计算结果的精度提高很大,其它误差主要来源于变压器的激磁回路。从图 8 中还可以得出,漏抗压降比激磁电流的影响大,这主要是因为当发电机的对地电容很大时,折算到二次侧的容抗较小,这样在等效电路中与其串联的变压器漏阻抗产生的压降相对会有较大的影响。表 1 列出了一些给定接地过渡电阻值下的计算接地电阻值和误差数据。可以看出,计入漏抗压降时相对误差要小得多。但是当过渡电阻为 545.6Ω 时,忽略漏抗压降时计算出的相对误差为 0,这是参数配合上的巧合,不能说明其准确测量了过渡电阻值。

表 1 过渡电阻计算值及误差

Tab 1 Transition resistance calculation values and errors

过渡电阻 / Ω	忽略漏抗压降		计入漏抗压降	
	计算值 / Ω	相对误差 / (%)	计算值 / Ω	相对误差 / (%)
500	530.1	-6.01	497.6	0.48
545.6	545.6	0	542.75	0.52
1000	760.29	24.0	990.46	0.95
1500	1036.04	30.93	1478.64	1.42
2000	1318.67	34.07	1962.21	1.89
3000	1878.1	37.4	2915.76	2.81
7000	3921.0	43.99	6557.93	6.31

由以上分析可知,当不考虑配电变压器的漏抗压降时,计算的接地过渡电阻有较大偏差,接地过渡电阻越大时偏差越大,使得在较大接地电阻时不能给出准确的报警信息。所以为使保护判断能够较准确地给出报警信息,应该考虑接地变压器的漏抗压降和激磁电流的影响。

变压器不饱和时的激磁阻抗要比饱和时的大,

为了分析变压器激磁阻抗的影响,进一步增大激磁阻抗到正常时的 5 倍。图 9 给出了认为激磁回路开路,忽略和计入漏抗压降在二次侧计算的一次侧接地电阻值。从图中可以看出,随着激磁阻抗的增加,激磁回路的影响变小,而主要是漏抗的影响,这时忽略激磁阻抗的影响也能满足工程需要。由于变压器漏抗基本不随变压器的饱和程度变化,这将有利于保护判据的补偿实现。

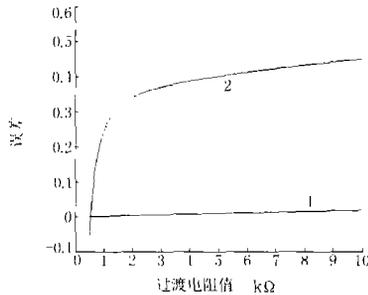


图 9 增大激磁阻抗后变压器参数的影响
Fig 9 Influence of the transformer's parameter after increasing the exciting impedance

表 2 中列举了一些给定接地过渡电阻值下的计算接地电阻值和误差数据。零误差的出现同样不能说明其测量的准确性。

表 2 过渡电阻计算值及误差
Tab 2 Transition resistance calculation values and errors

过渡电阻 /	忽略漏抗压降		计入漏抗压降	
	计算值 /	相对误差 / (%)	计算值 /	相对误差 / (%)
500	526.36	-5.27	499.52	0.096
539.5	539.5	0	538.94	0.104
1 000	755.38	24.46	988.08	0.19
1 500	1 032	31.2	1 495.68	0.29
2 000	1 317.41	34.13	1 992.32	0.38
3 000	1 887.72	37.08	2 982.77	0.57
7 000	4 031.2	42.41	6 906.88	1.33

1.2 中性点经消弧线圈接地方式

(a) 外加电源内阻的影响

图 2 和图 3 (b) 分别为中性点经消弧线圈接地方式下,外加电源式定子接地保护的接线图和等效电路图。发电机参数同上,消弧线圈电感值为 2.77 H。当考虑外加电源内阻的影响时,电流判据也存在灵敏度不高的情况。图 10 给出了比较结果。

当考虑电源内阻时,计算出接地过渡电阻在小于 13.07 的范围内时,所测量到的动作电流值才是增大的。在考虑一定阈值后,灵敏度会更低。可见,对于中性点经消弧线圈接地方式,当外加电源从

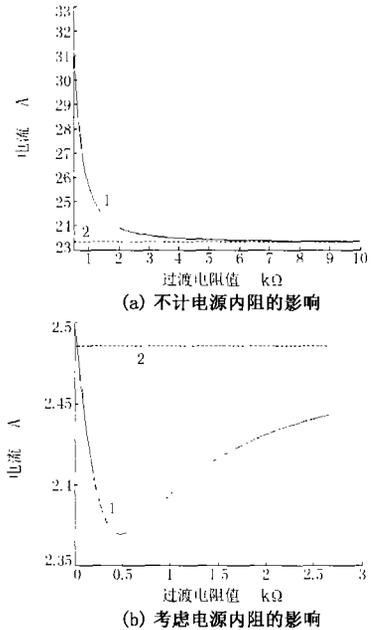


图 10 中性点经消弧线圈接地
Fig 10 Neutral grounded through extinction coil

中性点注入时,电流判据不适用。

(b) 消弧线圈漏感的影响

对于导纳判据,

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{1}{R_K} + j3 C_g + \frac{1}{j L_N} \quad (7)$$

折算到一次侧的接地过渡电阻值为

$$R_K = n^2 \frac{1}{\text{Re}(Y)} \quad (8)$$

在这里同样存在一个问题,就是消弧线圈漏感对保护判据的影响。消弧线圈的电感值由主电感和漏电感两部分组成,即 $L_N = L_m + L_1$ (L_m 为折算到二次侧的主电感, L_1 为折算到二次侧的一次侧绕组漏感值),消弧线圈的漏感较大,通常占 20% 左右,把消弧线圈的整个电感值都作为主电感考虑,将引起较大的误差。

如果中性点经消弧线圈接地,外加电源由消弧线圈的二次侧线圈注入,假设二次侧绕组的漏感 L_2 等于一次侧的漏电感 L_1 。因为消弧线圈的漏电感较大,若采用变压器的一型等效电路,计算将带来较大误差。图 11 给出了考虑漏抗压降,但忽略激磁电阻和绕组电阻的 T 型等效电路。

同样以上面的发电机设计为例,选取补偿系数 $K=1.1$,消弧线圈的电感值取为 $L_N=1.85$ (一次侧值),取漏电感占 20%,选择消弧线圈变比与上面配电变压器的相同。图 12 中给出了在忽略消弧线圈漏抗的影响时计算的接地过渡电阻值的误差。可以

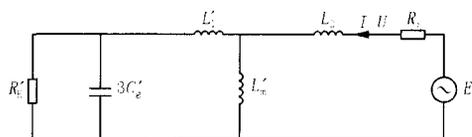


图 11 漏感与主电感分开的等效电路

Fig 11 Equivalent circuit of dividing the leakage inductance and the main inductance

看出,计算相对误差很大,如果再考虑一、二次绕组的电阻影响,偏差还会加大。

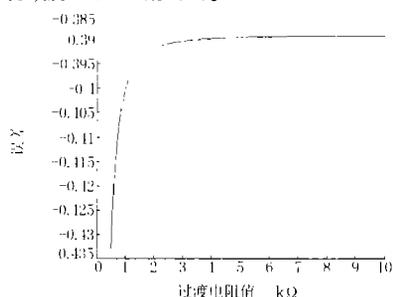


图 12 忽略漏抗压降时的相对误差

Fig 12 Relative error ignoring the leakage inductance pressure drop

从计算分析中可以看出,由二次侧测量计算一次侧的接地故障电阻值时,应该考虑消弧线圈漏电感和主电感的影响。因为消弧线圈漏抗较大,在补偿修正时如果仅仅考虑漏感或主电感某一方面,可能得不到较好的补偿结果,应该同时考虑漏感和主电感的影响。

2 结论

无论是在中性点经配电变压器高阻接地方式下,还是在中性点经消弧线圈接地方式下,外加电源内阻对电流判据的灵敏度有很大影响。当计及电源内阻时,保护的灵敏度降低(中性点经消弧线圈接地方式下保护的灵敏度更低一些),而且随着过渡电阻的增大,测得的电流值呈现出非单调变化。在实际运用中必须对这种情况加以重视。导纳判据的灵敏度高于电流判据的灵敏度,它基本不受外加电源内阻的影响,但是配电变压器的漏阻抗和激磁阻抗以及消弧线圈的漏阻抗对外加电源的导纳判据计

算一次侧接地电阻的影响很大,实际计算中应根据图 7和图 11所示的等效电路考虑它们的影响。

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
WANG Wei-jian The Principle and Application Electrical Main Equipment, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press,2002
- [2] 刘建雷. 发电机定子单相接地保护存在问题探讨[J]. 电工技术杂志,2002,(6):61-62
LIU Jian-lei The Probing on Problems of Generator Stator Single-phase Grounding Protection[J]. Electrotechnical Journal,2002,(6):61-62
- [3] 毕大强,王祥珩,等. 发电机中性点接地装置等效电路的分析[J]. 继电器,2003,31(1):12-16
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, et al Analysis on the Equivalent Circuit of Grounding Equipments at the Neutral of Power Generator[J]. Relay,2003,31(1):12-16
- [4] 张忠禄,贾振国. 大型发电机中性点接地方式与定子接地保护[J]. 吉林电力技术,1998,(6):5-7.
ZHANG Zhong-lu, JIA Zhen-guo Neutral Grounding Method of High-rating Generator and Stator Grounding Protection[J]. Jilin Electric Power Technology,1998,(6):5-7.
- [5] 王维俭,徐振宇,张振华. 大型发电机定子单相接地保护的研讨[J]. 继电器,1999,27(4):6-9.
WANG Wei-jian, XU Zhen-yu, ZHANG Zhen-hua Research and Discussion on Single-phase Earth Protection of Large Generator Stator[J]. Relay,1999,27(4):6-9.
- [6] BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, XU Zhen-yu, et al Analysis and Improvement on the Stator Earth-fault Protection by Injecting 20Hz Signal[A]. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems Shenyang:2001.

收稿日期:2004-10-08; 修回日期:2004-11-28

作者简介:

侯有韬(1978-),男,硕士,从事电网运行及继电保护技术工作;E-mail:hyt_d@sina.com

张丽丽(1977-),女,硕士,研究方向为计算机在电力系统中的应用。

Influencing factors of stator ground-fault protection with outside sources

HOU You-tao¹, ZHANG Li-li²

(1. Yunnan Power Dispatching Center, Kunming 650011, China; 2 North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(下转第 81 页 continued on page 81)

个方面采取对策:

1)在订购设备时,应在技术协议书中注明装置是用在大电流接地系统还是小电流接地系统中,以保证设备生产厂家在供货时提供符合现场实际运行所需要的软件程序。

2)在投产前,应通过对零序反闭锁功能的试验来进一步确认厂家所提供的软件程序满足系统要求。

4 结束语

尽管微机保护装置大多采用自产 $3U_0$,很少需要接入外加 $3U_0$,但也不能因此而轻视对开口三角回路的检查。前面所介绍的两起事故说明,这是保证保护及自动装置正确动作的一个不可缺少的重要环节,它不仅包括对端子螺丝松紧度的检查,还需要利用系统电压检验回路的接线正确性。

另外,在设备订货时,大家对保护装置程序版本的要求也可能不会引起重视,设备生产厂家在装置的使用说明书中也不一定对此类特殊情况做出专门解释,这样就有可能在运行过程当中出现疏漏。所

以,在技术协议书中加以注明的同时,充分利用试验手段对保护装置作认真的功能性检验,也是防止事故的必要措施之一。

参考文献:

- [1] 刘万顺. 电力系统故障分析 [M]. 北京:水利电力出版社,1986
L U Wan-shun Malfunction Analysis of Electric Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1986
- [2] 牛维扬. 电机学 [M]. 北京:中国电力出版社,1998
N U Wei-yang Electromechanics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998

收稿日期: 2004-09-23; 修回日期: 2004-10-21

作者简介:

马永才(1957-),男,高级技师,大专,从事继电保护技术管理工作;

孙昕(1973-),男,助理工程师,本科,从事继电保护技术管理工作。E-mail: sun-xin@qz zpepc.com.cn

Analysis and measures against the abnormal operation of zero sequence sectionalizing equipment

MA Yong-cai, SUN Xin

(Quzhou Electric Power Bureau, Quzhou 324002, China)

Abstract: Through analysis and illustration of several abnormal operation of zero sequence sectionalizing equipment, this paper gives the countermeasures. It provides reference for preventing the same accidents.

Key words: sectionalization; abnormal; analysis; reference

(上接第 31 页 continued from page 31)

Abstract: The paper takes the 20Hz AC source as an example. Under different modes of neutral point ground, considering the rejection mode of outside source from neutral point, the influence of outside sources on the current criterion is analyzed. And the influence that leakage reactance of transformer and leakage induction of extinction coil on the admittance criterions is detailed and its measurement errors are analysed.

Key words: outside sources; inherent resistance; stator; ground-fault protection

(上接第 74 页 continued from page 74)

Analysis and improvement of CT secondary breakage criterion in generator differential protection

L I De-jia¹, J I Xiao-hong²

(1. Qinshan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd, Haiyan 314300, China;

2. Electric Power Branch, Xi'an Design Research Institute of Coal Industry, Xi'an 710054, China)

Abstract: Through the analysis of CT secondary break in generator differential protection, this paper studies the principles of CT secondary breakage of the domestic microcomputer-based generator differential protection. And practical CT secondary breakage criterion is concluded.

Key words: differential protection; CT secondary breakage; generator