

基于暂态能量的故障选相方法研究

周健

(广东电网公司茂名供电局, 广东 茂名 525000)

摘要: 提出了一种基于暂态能量的超高压输电线路选相方案, 在分析各种故障类型的电气量特征基础上, 利用三相暂态能量构成了选相方案。理论分析和 ATP 仿真实验验证了该方案动作速度快, 对故障类型, 故障位置, 过渡电阻及故障时刻不敏感, 且不受 CT 饱和, 系统振荡, 系统结构和运行方式的影响。

关键词: 暂态能量; 故障检测; 故障选相

Research of phase-selection based on transient energy

ZHOU Jian

(Maoming Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid, Maoming 525000, China)

Abstract: This paper proposes a novel phase-selection based on transient energy. Based on analyzing the electric quantity of every fault styles, transient energy is utilized to construct phase-selection method. Theoretical analysis and simulation result indicate that the scheme can select fault phase correctly and quickly in case of various fault conditions involving different position, path resistances, as well as inception angle, it is immunized to CT saturation, power swings, system configuration and operating mode.

Key words: transient energy; fault detection; fault selection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1673-3415(2008)15-0010-04

0 引言

超高压线路三相运行, 在自动重合闸时需要进行故障选相。传统的故障选相主要是基于工频量, 采用突变量与稳态量的选相方案^[1-3], 其选相速度不能满足超高压保护的快速跳闸要求。

基于行波的选相方案由于其快速性受到了广泛的关注。文献[4]提出了利用故障噪声结合神经网络的故障选相方法, 但讨论了单相故障的识别, 并且神经网络需要进行大量的训练。文献[5,6]利用零模和线模电流行波幅值之间的关系来实现故障选相, 但是由于零模分量的衰减, 当线路末端发生故障时, 会出现误判。文献[7]比较三相电流行波之差的极性进行故障选相, 但对于两相接地和三相短路接地, 不能准确识别。文献[8]利用电流故障分量的暂态能量进行故障选相, 在一定程度上弥补了基于初始行波的选相方法的不足。文献[9]利用电流行波进行故障选相, 提高了单相和两相接地的可靠性。

本文在分析各种故障类型的电气量特征基础上, 结合实际线路结构, 给出了一种基于暂态能量的故障选相方法, 该方法先利用零序电流识别接地

故障, 然后利用故障分量的能量来识别故障类型和故障相。理论分析和仿真实验证明: 该方案动作速度快, 对故障类型、故障位置、过渡电阻及故障起始角不敏感, 不受 CT 饱和、系统振荡、系统结构和运行方式的影响。

1 故障特征分析

电力系统三相导线之间存在耦合, 本文拟利用三相导线的暂态能量特点进行故障选相。

1.1 超高压输电线路导线之间的耦合关系

图1给出了平行多导线系统示意图。

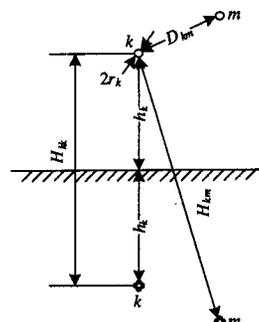


图1 平行多导线线路

Fig.1 Parallel multi-conductor system

导线 k 的自波阻抗和互波阻抗计算公式分别为^[10]:

$$Z_{kk} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{H_{kk}}{r_k} \quad (1)$$

$$Z_{km} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{H_{km}}{D_{km}} \quad (2)$$

$\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m, 为空气导磁系数; $\epsilon_0=10^{-9}/36 \pi$ F/m 为空气介电系数。将二者代入上式可得

$$Z_{kk} = 60 \ln \frac{H_{kk}}{r_k} \quad (3)$$

$$Z_{km} = 60 \ln \frac{H_{km}}{D_{km}} \quad (4)$$

当行波沿一条导线传播时, 其他平行导线将受电磁场的作用而形成耦合波, 其强度取决于导线间的耦合系数 k

$$k = Z_{km} / Z_{kk} = \ln \frac{H_{km}}{D_{km}} / \ln \frac{H_{kk}}{r_k} \quad (5)$$

k 与导线之间的距离有很大关系, 两根导线距离越近, 其耦合系数越大。超高压输电线路中三相导线常见的架设方式有水平排列、垂直排列和三角排列。相对而言, 水平排列的空间对称性最弱, 造成三相间故障行波的区分较为困难。本文选择这种三相水平排列且不换位的较难选相的布置方式来分析故障特征并提出故障选相的算法。对于水平排列的线路类型 (见图2), A、C相与B相的耦合系数相等且小于1, 即 $k_{AB}=k_{BC}<1$ (实际输电线路一般为 $k_{AB}=k_{BC}<0.2$); A相与B相、A相与C相的耦合系数 k_{AB} 、 k_{AC} 之间是 $1 > k_{AB} > k_{AC}$ 。

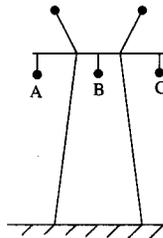


图2 超高压水平布置线路

Fig.2 Transmission line horizontal layout in EHV system

1.2 故障特征分析

1.2.1 单相接地

当线路发生 A 相接地时, 设故障点初始电压为 U_0 , 线路波阻抗为 Z_c , AB 与 AC 间的耦合系数分别为 k_1 和 k_2 , 则 B、C 两相初始电压为 $U_b = k_1 U_a = k_1 U_0$, $U_c = k_2 U_a = k_2 U_0$, 初始电流

为 $I_b = U_b / Z_c = k_1 U_0 / Z_c$, $I_c = U_c / Z_c = k_2 U_0 / Z_c$, 所以 B、C 两相的能量分别为

$$|E_b| = |U_b I_b| = k_1^2 |E_a|$$

$$|E_c| = |U_c I_c| = k_2^2 |E_a|$$

由于 k_1 和 k_2 都小于 1, 所以故障相 (A 相) 的能量最大, B、C 两相能量较小, 且零序电流非零, 一般很大。C 相接地时, 故障特征类似。

当线路发生 B 相接地时, 由于 $k_{AB}=k_{BC}<1$, 所以 B 相能量最大, A、C 两相能量相等, 且零序电流非零。

1.2.2 两相短路

当线路发生 BC 两相短路时, 此时没有零序分量产生, 且 $U_b=U_c$, $I_b=-I_c$ 。设 AB 与 AC 间的耦合系数分别为 k_1 和 k_2 ,

$$|E_b|=|E_c|$$

$$|E_a|=|(k_1 U_b+k_2 U_c)(k_1 I_b+k_2 I_c)| = |(k_1^2-k_2^2) U_b I_b| = |k_1^2-k_2^2| E_b$$

所以非故障相 (A 相) 能量最小, 两故障相能量相等, AB 两相短路时, 故障特征类似。

当线路发生 AC 两相短路时, 由于 $k_{AB}=k_{BC}$, 非故障相 (A 相) 能量为 0, 两故障相能量相等。

1.2.3 两相接地短路

若发生 BC 两相接地, 此时零序电流不为 0, 非故障相 (A 相) 的能量最小, 非故障相和故障相的能量满足以下关系

$$|E_a| < |E_b|$$

$$|E_a| < |E_c|$$

AB、BC 两相接地时, 故障特征类似。

1.2.4 三相短路

线路发生三相短路时, $|E_a|, |E_b|, |E_c|$ 总有差别, 最大值与次大值之间差值不为 0。

表 1 给出了不同故障类型下, 线路三相导线的能量特征。

表 1 不同故障类型的能量特征

Tab.1 Energy feature of different type faults

故障类型	$ E_a $	$ E_b $	$ E_c $	零模分量
Ag	大	小	小	有
Bg	小	大	小	有
Cg	小	小	大	有
BC	小	大	大	无
AB	大	大	小	无
AC	大	0	大	无
BCg	小	大	大	有
ABg	大	大	小	有
ACg	大	小	大	有
ABC	大	大	大	无

2 故障选相

通过以上分析,可以得出利用输电线路三相之间的能量关系可以区分故障类型,选出故障相别。具体可以分为以下几个步骤:

1)采集三相电流、电压,求取故障分量和零序电流;

2)计算三相导线的能量 $|E_a|,|E_b|,|E_c|$,对其进行归一化处理,并按从大到小的顺序进行排序,记为 $|E_1|,|E_2|,|E_3|$;

3)若零序电流为 0,表示线路发生相间短路故障,若零序电流不为 0,表示线路发生接地故障;

4)对于相间短路,若 $|E_1|,|E_2|,|E_3|$ 三个能量当中,其中两个相等,且远大于另外一个,则发生两相短路,能量最小的相对应非故障相;若 $|E_1|,|E_2|,|E_3|$ 都很大,则发生三相短路;

5)对于接地故障, $|E_1|,|E_2|,|E_3|$ 其中一个远大于另外两个,则发生单相接地故障,能量最大的相对应故障相; $|E_1|,|E_2|,|E_3|$ 中一个较小,另外两个较大,则发生两相接地故障,能量最小的相对应非故障相。

由于该方案利用三相暂态能量,所以不受 CT 饱和、系统振荡、系统结构和运行方式的影响。

具体的选相算法流程见图 3,其中 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ 为阈值, ϵ_1 是用来判断故障是否为接地故障; ϵ_2 用来区分三相短路和两相短路; ϵ_3 用来区分两相接地和单相接地。

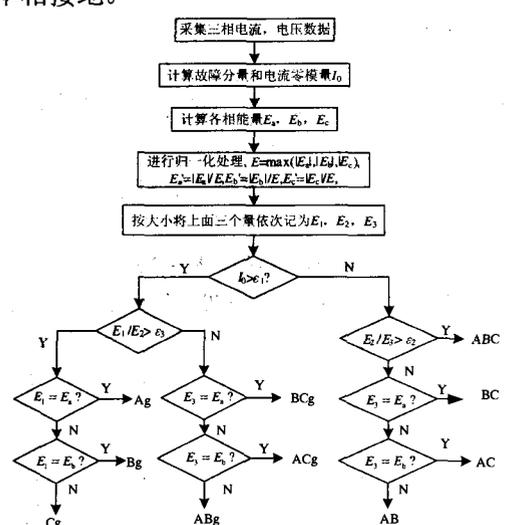


图 3 故障选相流程图

Fig.3 Flow chart of faulty-phase selection

3 仿真实证

图 4 给出了仿真系统图,系统参数采用华中电网平武线的参数,计及线路依频特性,线路 PM,MN,NQ 长度分别为 130 km, 100 km, 120 km, 采样率为 100 kHz, 计算能量所用的数据窗为四分之一周波, F_1, F_2, F_3 为三个故障点, 距离母线 M 分别为 20 km, 50 km 和 90 km, 保护安装在 A 处。 ϵ_1, ϵ_2 和 ϵ_3 分别整定为 0.05, 10, 10。

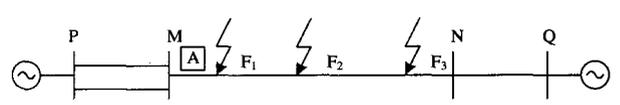
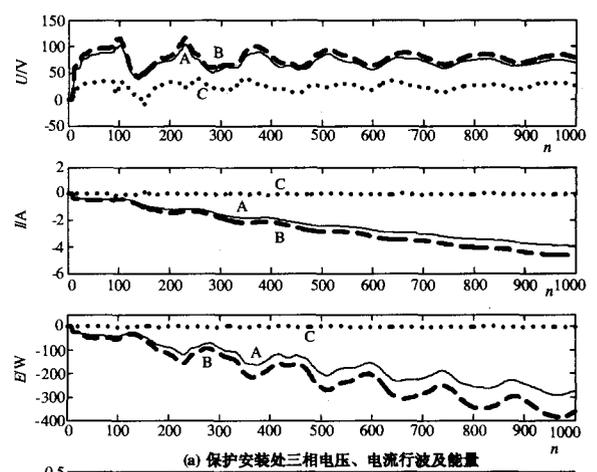


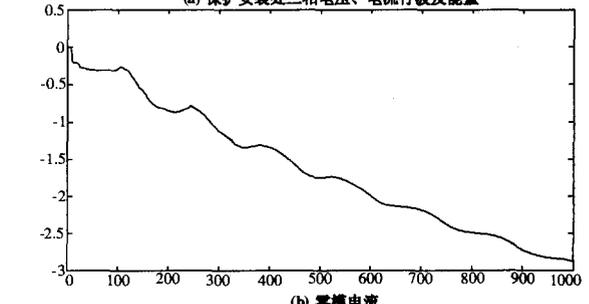
图 4 仿真系统图

Fig.4 Simulation system

图 5 给出了 F_2 处发生 AB 两相接地故障时保护安装处的三相电流、电压行波, 零序电流和三相能量波形, 其中 $|E_a|$ 为 326.2619, $|E_b|$ 为 432.8074, $|E_c|$ 为 2.0104, 根据图 2 所示选相流程, 存在零序电流可以判断故障是接地故障, 且 $|E_b|/|E_a| < 10$, 可以判断发生了两相接地故障, $|E_c|$ 最小可以判断非故障相为 C 相。



(a) 保护安装处三相电压、电流行波及能量



(b) 零模电流

图 5 F_2 处发生 AB 两相接地时, 保护安装处三相电压、电流行波, 能量和零模电流

Fig.5 Three phases current, voltage traveling waves, energy and zero modal current in A when AB grounding at F_2

表2给出了 F_2 处发生不同类型故障时的选相结果。

表2 F_2 处发生不同类型故障时的识别结果

Tab.2 Faulty-phase selection result of different type faults at F_2

故障类型	$ E_a $	$ E_b $	$ E_c $	I_0	判断结果
Ag	304.6	12.5	12.2	1.0	Ag
AB	178.6	178.6	0.1	0.02	AB
ABg	326.2	432.8	2.0	0.4	ABg
ABC	248.5	194.5	254.9	0.01	ABC

表3给出了 F_2 处发生A相经不同过渡电阻接地时的 $|E_a|, |E_b|, |E_c|$ 。从表中可以看出过渡电阻不会影响选相的正确性。但是在线路末端发生经高阻接地时,灵敏度可能降低,可以通过增加数据窗长度的办法加以克服。

表3 F_2 处发生A相经不同过渡电阻接地时三相能量

Tab.3 Energy of three lines when A grounding at F_2 with different resistances

过渡电阻	$ E_a $	$ E_b $	$ E_c $
0 Ω	304.6	12.5	12.2
50 Ω	265.5	10.6	10.6
100 Ω	165.6	6.62	6.62
200 Ω	101.8	4.1	4.1

表4给出了不同故障时刻, F_2 处发生BC两相短路时的 $|E_a|, |E_b|, |E_c|$,从中可以看出,该方法基本不受故障时刻的影响。

表4 F_2 处发生BC两相短路时的三相能量

Tab.4 Energy of three lines when A grounding in F_2 at different fault time

故障角度	$ E_a $	$ E_b $	$ E_c $
5°	1.0	155.4	155.4
30°	0.5	169.5	169.5
60°	0.1	178.6	178.6
90°	0.08	201.5	203.1

表5给出了不同位置发生AB两相接地时的 $|E_a|, |E_b|, |E_c|$,从表中可以看出,故障点位于线路始端、中点、末端时,该方法均可准确选相。

表5 不同故障位置发生AB两相接地时的三相能量

Tab.5 Energy of three lines when AB grounding at different fault location

故障位置	$ E_a $	$ E_b $	$ E_c $
F_1	358.9	464.5	5.5
F_2	326.2	432.8	2.0
F_3	304.4	415.4	1.6

4 结论

本文给出了一种基于暂态能量的故障选相方

法,该方法利用零序电流和故障分量的能量来识别故障类型和故障相。理论分析和仿真实验证明:该方案动作速度快,对故障类型、故障位置、过渡电阻及故障起始角不敏感,不受CT饱和、系统振荡、系统结构和运行方式的影响。

参考文献

- [1] 许庆强,索南加乐,宋国兵,等.一种电流故障分量高压线路保护选相元件[J].电力系统自动化,2003,27(7):50-54.
XU Qing-qiang, SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, et al. A Fault Phase Selector for Transmission Line Protective Relaying Using Current Fault Components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(7): 50-54.
- [2] 郑涛,刘万顺,杨奇逊.一种基于模糊分量的新型故障序分量选相元件[J].电力系统自动化,2003,27(12):41-43.
ZHENG Tao, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun. A New Phase Selector Based on Fault Sequence Components and Fuzzy Logic Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(12):41-43.
- [3] 常宝波,段玉倩,贺家李,等.一种用于零、负序电流纵差保护的实用选相元件[J].电力系统自动化,2005,29(20):76-79.
CHANG Bao-bo, DUAN Yu-qian, HE Jia-li, et al. Practical Fault Phase Selection Method for Line Zero and Negative Sequence Current Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 76-79.
- [4] Bo Z Q, Aggarwal R K, Johns A T. A New Approach to Phase Selection Using Fault Generated High Frequency Noise and Neural Network[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 106-114.
- [5] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术[M].西安:西安交通大学出版社,1996.
- [6] 危初勇,刘春芳.基于小波理论的超高压线路故障定位与选相方法[J].中国电机工程学报,2000,20(5):85-88.
WEI Ren-yong, LIU Chun-fang. Approach of Fault Location and Fault Phase Selection in UHV Power Transmission Lines Based on Wavelet Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 85-88.
- [7] 贺家李,葛耀中.超高压输电线路故障分析与继电保护[M].北京:科学出版社,1987.
- [8] 段建东,张保会,周艺.基于暂态量的超高压输电线路故障选相[J].中国电机工程学报,2006,26(3):1-6.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Transient-based Faulty Phase Selection in EHV Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 1-6.

(下转第17页 continued on page 17)

电流、另外两相串联单元开关不动作;两相故障时,仅补偿故障的两相电流、另外一相串联单元开关不动作。因此,无隔离三相统一电能质量控制器,对每相故障限流功能来说,它只检测、判断该相电流是否正常,是否需要补偿,每相具有独立补偿的功能,不需进行故障类型分析,每相补偿策略与故障类型无关。

4 结语

本文在以前研究成果的基础上,针对负载侧短路时引起的过流问题,进行了研究,并提出了相应的控制策略。经过分析表明,故障期间所采取的限流措施并没有影响系统并联单元的稳定性。最后通过 PSCAD/EMTDC 软件进行了仿真研究,仿真结果表明所提出的控制策略能有效地限制故障电流,从而克服了负载侧故障时 UPQC 装置只能采取旁路的缺陷。

参考文献

- [1] Fujita H, Akagi H. The Unified Power Quality Conditioner: the Integration of Series- and Shunt-Active Filters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13 (2): 315-322.
- [2] 李国勇,刘汉奎,徐殿国,等.统一电能质量调节器的研究[J].电力电子技术,2003,37(1):74-78.
LI Guo-yong, LIU Han-kui, XU Dian-guo, et al. Study on Unified Power Quality Conditioner[J]. Power Electronics, 2003, 37 (1): 74-78.
- [3] 朱鹏程,李勋,康勇,等.统一电能质量控制器控制策略的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8):67-73.
ZHU Peng-cheng, LI Xun, KANG Yong, et al. Study of Control Strategy for a Unified Power Quality Conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 67-73.
- [4] 汤其彩,刘惠康,周华忠.统一电能质量调节器(UPQC)的补偿控制策略研究[J].继电器,2007,35(12):32-

35.

- TANG Qi-cai, LIU Hui-kang, ZHOU Hua-zhong. Research on Compensation Control Strategy of Unified Power Quality Conditioner[J]. Relay, 2007, 35 (12): 32-35.
- [5] 张秀娟,姜其荣,韩英铎.一种新型的单相统一电能质量调节器[J].电力系统自动化,2004,28(23):76-80.
ZHANG Xiu-juan, JIANG Qi-rong, HAN Ying-duo. A Novel Single Phase Unified Power Quality Conditioner[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (23): 76-80.
- [6] 张谢平,李国杰,孙元章.一种无隔离环节的三相统一电能质量控制器[J].电力系统自动化,2006,30(20):59-67.
ZHANG Xie-ping, LI Guo-jie, SUN Yuan-zhang. A Three-phase Unified Power Quality Controller Without Isolating Circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (20): 59-67.
- [7] Choi S S, T. Wang X, Vilathgamuwa D M. A Series Compensator with Fault Current Limiting Function[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2248-2256.
- [8] Vilathgamuwa D M, Wijekoon H W, Choi S S. A Novel Technique to Compensate Voltage Sags in Multi-line Distribution System—the Inter Line Dynamic Voltage Restorer[J].IEEE Trans on Indus Electron,2006, 53(5): 1603-1611.

收稿日期:2008-03-04; 修回日期:2008-04-08

作者简介:

胡家为(1965-),男,副研究员,从事电力系统保护、监控及电力电子等领域的研究;E-mail: hujiawei@mail.tsinghua.edu.cn

李国杰(1965-),男,副教授,从事电能质量、电力系统分析与控制及新能源的研究;

马锋(1983-),男,硕士研究生,从事电能质量、电力系统分析与控制的研究。

(上接第13页 continued from page 13)

- [9] 段建东,张保会,周艺.利用电流行波进行超高压输电线路故障类型识别的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(7):58-62.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Study of Fault-type Identification Using Current Traveling-waves in Extra-high-voltage Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 58-62.

- [10] 张纬钺,何金良,高玉明.过电压防护与绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2002.

收稿日期:2007-11-21; 修回日期:2008-04-03

作者简介:

周健(1972-),男,硕士,工程师,从事电网规划及电网建设工程管理工作。E-mail:mmzjcpu@sina.com