基于补偿电压复合极化量的自适应距离继电器

黄少锋[1]，刘千宽[1]，柳焕章[2]，李永斌[1]

(1. 华北电力大学电力系统保护和动态安全监控教育部重点实验室，北京市 102206)

(2. 华中电力调度通信中心，湖北省武汉市 430077)

摘要： 方向阻抗继电器通常采用单一电压如正序电压作为极化量，其动作特性固定不变，不能自适应过渡电阻的变化。当高压输电线路发生单相经高阻接地故障时，过渡电阻可能导致阻抗继电器的稳态超越。在提高阻抗继电器自适应过渡电阻能力的同时，为避免因过渡电阻引起的不正确动作，利用补偿电压随过渡电阻变化的特性，提出了由补偿电压构成的复合电压作为极化量的阻抗继电器。在电压平面和阻抗平面分析了该继电器的动作特性，并以 300 km 线路 500 kV 双端电源系统为模型进行了仿真验证。理论分析和仿真计算表明该继电器具有较强的耐过渡电阻能力。

关键词： 距离继电器；过渡电阻；圆特性；线路保护

中图分类号： TM773

0　引言

阻抗继电器一般以故障点的电压边界条件建立动作判据，其判据通常由补偿电压和极化电压构成。而极化电压的选择具有多样性，选择不同的极化电压可得到不同特性的阻抗继电器[1-2]。通常的方向阻抗继电器选择单个电压量作为极化量，如仅以正序电压或保护安装处至整定点之间某一点故障前的电压为极化量，而构成的阻抗继电器的动作边界是固定的，对过渡电阻不具有自适应能力。为了提高方向阻抗继电器的耐过渡电阻能力，自适应单相接地故障过渡电阻的距离继电器得到了深入的研究[3-5]。文献[6]提出的一种自适应阻抗继电器所取的极化电压为保护安装处故障前的故障相电压与故障后的电压之差，即母线电压突变量。该继电器在阻抗平面的动作特性近乎于电抗特性，具有极强的耐过渡电阻能力，但其安全性难以得到保障。提高阻抗继电器的耐过渡电阻能力和防止稳态超越是一对不可调和的矛盾，因此为保证阻抗继电器的安全性，牺牲一定的耐过渡电阻能力是不可避免的。

按整定点电压计算的补偿电压具有随过渡电阻变化的特性，利用这一特性，本文提出一种由故障前记忆的补偿电压和故障后补偿电压构成的复合极化电压，能完全自适应过渡电阻的变化轨迹，并在改善阻抗继电器的耐过渡电阻能力的同时，提高继电器在外部故障时的安全性。

收稿日期：2007-03-03；修回日期：2007-04-24。

1　复合极化量的阻抗继电器

1.1　自适应阻抗继电器的原理判据

图 1 所示为一个双端电源系统。保护分别安装在线路 MN 两侧，M 侧为送电端，N 侧为受电端，Y 为整定点，线路阻抗为 Z_L，两侧系统阻抗分别为 Z_S 和 Z_R。Y 点发生单相接地故障时的电压相量图如图 2 所示。

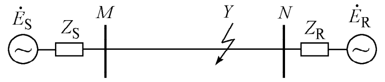


图 1　双端电源系统
Fig. 1　A two-source power system

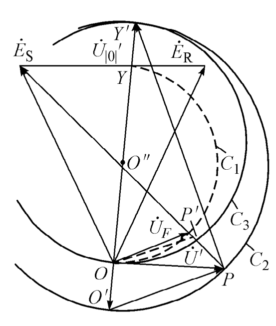


图 2　双端系统单相接地时电压相量图
Fig. 2　Voltage phasor diagram for single-phase-to-earth fault at *Y* in a two-source system

补偿电压通常按 $\dot{U}'=\dot{U}-\dot{I}Z_Y$ 计算，其中 Z_Y 为整定阻抗，则 Y 点故障前的补偿电压为 $\overrightarrow{OY}=\dot{U}_{|0|}'$，下标|0|表示故障前的量。图 2 中，$C_1$ 为在整定点 Y 处故障时过渡电阻上的电压随过渡电阻变化的轨迹，系统等效阻抗近似为 90°时，是以 O'' 为圆

心、OY 为直径的半圆。此时，补偿电压等于过渡电阻上的电压，$\dot{U}'=\dot{U}_F$。当保护范围内发生故障时，补偿电压 $\dot{U}'$ 将落在 C_1 圆外，如图中的 P 点。P 点随 $\dot{U}_F$ 的变化而变化，即随着过渡电阻的增大，P 点逆时针方向朝 Y 点移动，其轨迹也是一段圆弧。

若以 O'' 为圆心、$O''P$ 为半径，可得到圆 C_2，OY 两端的延长线 $O'Y'$ 即为圆 C_2 的直径。若选取 $\overrightarrow{PY'}$ 为极化电压，以 C_2 为动作边界，所得到的阻抗继电器即具有随过渡电阻变化的特性。从图 2 不难看出，以 $\overrightarrow{PY'}$ 为极化电压，因 $\overrightarrow{O'P}$ 超前补偿电压 $\dot{U}'$ 一定的角度，若选取 $\overrightarrow{O'P}$ 为补偿电压，则有利于防止继电器的超越。

令 $O''Y'=k_{op}|\dot{U}_{|0|}'|$，则

$$\overrightarrow{O'P}=\overrightarrow{OP}-\overrightarrow{OO'}=\dot{U}'-(0.5-k_{op})\dot{U}_{|0|}'$$

$$\overrightarrow{PY'}=\overrightarrow{OY'}-\overrightarrow{OP}=(0.5+k_{op})\dot{U}_{|0|}'-\dot{U}'$$

式中：k_{op} 定义为补偿系数。

分别以 $\overrightarrow{O'P}$ 或 $\overrightarrow{OP}$，$\overrightarrow{PY'}$ 为补偿电压和极化电压，不难得到以 C_2 和 C_3 为动作边界的自适应阻抗继电器的动作方程。

动作方程分别为：

$$90^\circ<\arg\frac{\dot{U}'-(0.5-k_{op})\dot{U}_{|0|}'}{(0.5+k_{op})\dot{U}_{|0|}'-\dot{U}'}<270^\circ \quad (1)$$

$$90^\circ<\arg\frac{\dot{U}'}{(0.5+k_{op})\dot{U}_{|0|}'-\dot{U}'}<270^\circ \quad (2)$$

C_2 和 C_3 的圆外分别为式(1)和式(2)区内故障的动作区。

1.2　补偿系数 k_{op} 的合理选择

补偿系数的选择影响自适应阻抗继电器的性能，但精确计算其大小是困难的，下面以送端为例做定性分析。图 3、图 4 分别为送端区内和区外故障电压相量图，图中 F 点为故障点，其故障前电压为 $\dot{U}_{F|0|}$。为简化分析，假设双端系统各阻抗角相同，以故障点为端口的系统等效阻抗角为 $\arg Z_{\Sigma L}$。θ 为 $-\dot{U}_F$ 与 $\dot{U}_{F|0|}-\dot{U}_F$ 之间的夹角，且 $\theta=180^\circ-\arg Z_{\Sigma L}$，$\beta$ 为 $-\dot{U}'$ 与 $\dot{U}_{|0|}'-\dot{U}'$ 之间的夹角。

送端区内故障时，如图 3 所示，随着故障点向整定点靠近，β 将增大接近于 θ；随着过渡电阻的增大，β 也将增大。β 的增大意味着减小补偿电压与极化电压 $\overrightarrow{PY'}$ 之间的角度。当 β 增大到使 $\theta-\beta=90^\circ-\arg Z_{\Sigma L}$ 时，自适应阻抗继电器将出现拒动。$O''Y'$ 越长即 k_{op} 越大，越容易拒动。可见减小 k_{op} 有利于增强耐过渡电阻能力和提高灵敏度。

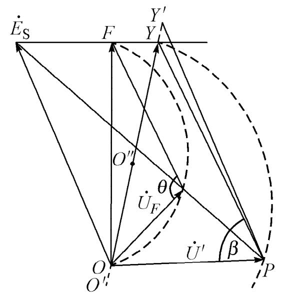
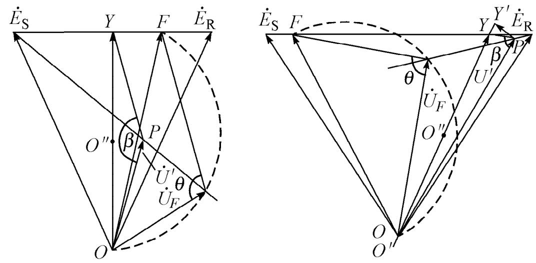


图 3　送端区内故障电压相量图

Fig. 3　Voltage diagram for internal fault at the sending end



(a) 正向故障　(b) 反向故障

图 4　送端区外故障电压相量图

Fig. 4　Voltage diagram for external fault at the sending end

送端区外正向故障或同相点之前即过渡电阻较小的反向故障时，随着故障点向整定点靠近，β 将减小，如图 4(a)所示；在同相点之后即过渡电阻较大的反向故障，随着故障点远离整定点，β 将减小，如图 4(b)所示。β 的减小意味着自适应阻抗继电器越容易误动，因此必须减小动作圆的动作区即增大 k_{op} 来加以克服。

送端的分析结论可推广到受端相应类型的故障。上述分析表明，区内和区外故障对 k_{op} 的选取有着不同的要求，而且两者互相矛盾，因此 k_{op} 的选取必须综合考虑灵敏度和安全性的关系。事实上，当 $k_{op}=0.5$ 时，自适应阻抗继电器的动作边界达到了极限，此时即使不考虑各种测量误差和干扰的影响，其误动的可能性也大大增加。因此 k_{op} 的选取应在确保不误动的前提下，尽可能地提高自适应阻抗继电器的灵敏度。为了保证安全性，根据故障前保护安装处的负荷工况，选取一定的可靠系数 1.2～1.6，这样 k_{op} 的选取范围可为 0.6～0.8。

尽管自适应阻抗继电器是以补偿电压与故障点过渡电阻上的电压的相位关系建立动作判据的，但因故障点电压难以获得，故障点电压的相位由故障前后的补偿电压之差旋转一定的角度后近似获取，因此继电器的性能随着保护安装位置即送端或受端、整定点和故障前负荷电流的不同而有所差别。

在系统不失稳的前提下，安装在送端的阻抗继电器，其故障前的补偿电压可能随线路负荷电流的增大而降低，为防止重负荷下阻抗继电器的超越，适当选取较大的补偿系数；而对受端的阻抗继电器，为增强其耐过渡电阻能力，可选取较小的补偿系数。为便于分析比较，本文在仿真计算中一律选取可靠系数为 1.3，即 $k_{\mathrm{op}}=0.65$。

1.3　电压平面上的动作特性

式(1)、式(2)具有完全相同的能自适应过渡电阻变化的复合极化量，因此，所构成的阻抗继电器均具有自适应过渡电阻的能力，本文称之为基于补偿电压复合极化量的自适应阻抗继电器。

由图 2 的电压相量图不难看出，$\overrightarrow{O'P}$ 超前补偿电压 $\dot{U}'$ 一定的角度，等效于将补偿电压 $\dot{U}'$ 的末端向 P' 移动，即缩短保护范围，因此式(1)能有效防止超越。图 2 中，圆 C_2 和圆 C_3 分别是动作方程式(1)和式(2)的边界，圆外为动作区。圆 C_3 比圆 C_2 的动作区大，表明式(2)比式(1)有更强的耐过渡电阻能力。

但是随着过渡电阻的增大，必然导致受电侧阻抗继电器“同相问题”的产生[7]，自适应阻抗继电器不可避免地要受到大过渡电阻引起的“同相问题”的影响。为了防止阻抗继电器在出现“同相问题”区间的不正确动作，通常采取增加闭锁条件和切换判据的措施[8-9]，而文献[10]意在补偿电压和极化电压中引入故障点电压来解决“同相问题”。本文认为阻抗继电器应尽可能提高耐过渡电阻能力，但并不意味着解决所有高阻接地故障，在过渡电阻高于一定程度时，牺牲阻抗继电器一定的耐过渡电阻能力完全可以接受。

2　阻抗特性分析

由于式(1)、式(2)具有相同的比相形式，因此可将其表示成统一形式如下：

$$90^\circ < \arg\frac{\dot{U}'-(0.5-k_X)\dot{U}_{|0|}'}{(0.5+k_{\mathrm{op}})\dot{U}_{|0|}'-\dot{U}'} < 270^\circ \qquad (3)$$

式中：$k_X=k_{\mathrm{op}}$ 时即为式(1)，$k_X=0.5$ 时为式(2)。

2.1　正向故障

正向故障时 $\dot{U}_{|0|}'\approx\dot{E}_{\mathrm{S}}=\dot{U}+\dot{I}Z_{\mathrm{S}}$，$Z_{\mathrm{S}}$ 为保护安装处背后的系统阻抗。式(3)可改写成：

$$90^\circ < \arg\frac{(0.5+k_X)\dot{U}-[Z_Y+(0.5-k_X)Z_{\mathrm{S}}]\dot{I}}{(k_{\mathrm{op}}-0.5)\dot{U}+[Z_Y+(0.5+k_{\mathrm{op}})Z_{\mathrm{S}}]\dot{I}} < 270^\circ$$

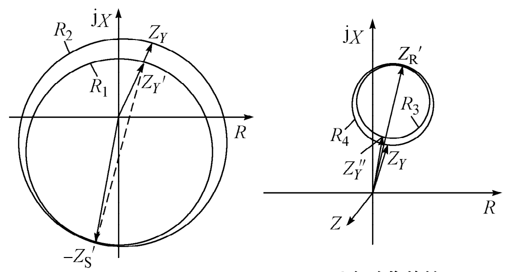
由于 $k_{\mathrm{op}}>0.5$，则 $\arg((0.5+k_X)/(k_{\mathrm{op}}-0.5))=0^\circ$。

令测量阻抗为 $Z=U/I$。上式可进一步改写为：$90^\circ<\arg((Z-Z_Y{}')/(Z-Z_{\mathrm{S}}{}'))<270^\circ$，其中：

$$Z_{\mathrm{S}}{}'=-[Z_Y+(0.5+k_{\mathrm{op}})Z_{\mathrm{S}}]/(k_{\mathrm{op}}-0.5)$$

$$Z_Y{}'=[Z_Y+(0.5-k_X)Z_{\mathrm{S}}]/(k_X+0.5)$$

其在阻抗平面的正向动作特性如图 5(a)所示。图 5(a)中，R_1 和 R_2 分别对应式(1)和式(2)的比相判据正向故障时的动作特性。对应式(1)和 R_1，$k_{\mathrm{op}}>0.5$，$k_X=k_{\mathrm{op}}$，因此 $-|Z_{\mathrm{S}}{}'|\ll-|Z_{\mathrm{S}}|$，自适应阻抗继电器具有较强的耐过渡电阻能力，同时 $|Z_Y{}'|<|Z_Y|$ 又能有效地防止超越。对应式(2)和 R_2，$k_X=0.5$，因此，$Z_Y{}'=Z_Y$，有利于自适应阻抗继电器满足保护范围。



(a) 正向动作特性　　(b) 反向动作特性

图 5　复合极化量阻抗继电器正向故障时的阻抗特性

Fig. 5　Impedance characteristics of the adaptive relay with composite polarizing voltage under a forward fault

2.2　反向故障

正向故障的动作特性包含坐标原点，并不表示阻抗继电器会失去方向性。反方向故障时的故障电流由对侧电源提供，此时，

$$\dot{U}_{|0|}'\approx\dot{E}_{\mathrm{R}}=\dot{U}-\dot{I}(Z_{\mathrm{L}}+Z_{\mathrm{R}})$$

同样的分析表明，反方向故障时，阻抗继电器的动作特性在第一象限，而测量阻抗在第三象限，在阻抗平面的动作特性如图 5(b)所示，因此继电器自身具有明确的方向性。

3　仿真试验

利用 PSCAD/EMTDC 软件建立一 500 kV 双端系统，仿真验证基于补偿电压复合极化量的自适应阻抗继电器的动作性能。仿真模型为典型的双端系统，如图 6 所示。G 为发电机，送电端；S 为无穷大等值系统，受电端；两侧电势角差为 δ。线路长 300 km，故障点设置为 K_1，K_5 两侧母线处，K_2，K_4 两侧出口处，K_3 线路中点。保护范围按线路全长的 85%整定。

仿真试验项目主要包括在轻负荷和重负荷等不同工况下的各种区内外金属性故障和高阻接地故障，单相接地故障的过渡电阻由 1 Ω～300 Ω 变化。

图 7 给出了 $\delta=5°$ 和 $\delta=45°$ 的 2 种功角下沿线各点单相接地故障时受端阻抗继电器所能经受的最大过渡电阻。

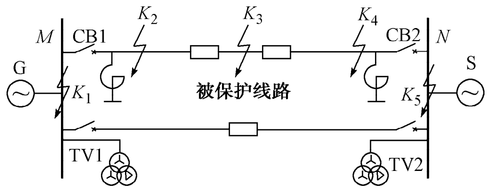


图 6　仿真系统和故障点设置示意图

Fig. 6　Two-source system model and fault locations

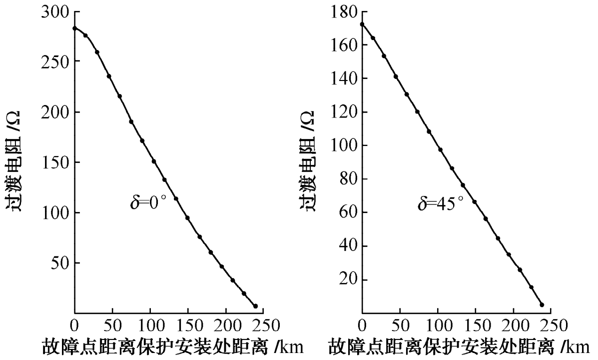


图 7　受端 2 种功角下自适应阻抗继电器的耐过渡电阻特性

Fig. 7　Characteristics of the relay against path resistance under two kinds of rotor angle at receiving terminal

在相同的故障工况下,安装在受端的自适应阻抗继电器,其耐过渡电阻能力较送端略差;但仿真表明,在经较高过渡电阻接地故障时,两侧能相继动作。仿真结果显示自适应阻抗继电器具有较好的耐过渡电阻能力,这是以保护安装处的电压为极化量的方向阻抗继电器所不具备的。仿真计算还表明,在正向区外金属性故障和带小过渡电阻故障时,不超越;在反方向故障时,不失去方向性。

4　结语

本文提出的基于故障前补偿电压的复合极化量具有自适应过渡电阻变化的特性,因而以此构成的阻抗继电器在保证安全性的前提下能自适应过渡电阻的变化,具有较强的耐过渡电阻能力,易于微机实现;并在故障后的补偿电压中适当引入故障前的补偿电压,可缩短继电器的保护范围,以防止超越。理论分析和仿真计算表明,该继电器可用于高压和超高压线路作为后备距离保护,具有较好的工程应用价值。

参 考 文 献

[1] 叶萍,陈德树.微机距离保护中几种接地距离继电器方案的分析比较.电力系统自动化,1994,10(6):19-23.
YE Ping, CHEN Deshu. Analysis and comparison of several schemes for digital ground distance relays. Automation of Electric Power Systems, 1994, 10(6): 19-23.

[2] 李岩,陈德树,尹项根,等.单相补偿式接地距离继电器统一形式的研究.电力系统自动化,2002,26(13):28-31.
LI Yan, CHEN Deshu, YIN Xianggen, et al. The uniform formula of earth fault distance relay with single-phase compensation. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 28-31.

[3] 李刚,隋凤海,陈涛,等.自适应碗形阻抗继电器.电力系统自动化,1995,19(6):51-54.
LI Gang, SUI Fenghai, CHEN Tao, et al. Adaptive impedance relay of bowl shape. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(6): 51-54.

[4] 刘卓辉,张艳霞,沈勇环.自适应接地距离继电器的研究.电力系统自动化,2005,29(10):21-25.
LIU Zhuohui, ZHANG Yanxia, SHEN Yonghuan. Study on adaptive ground distance relay. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 21-25.

[5] 索南加乐,许庆强,宋国兵,等.自适应接地距离继电器.电力系统自动化,2005,29(17):54-58.
SUONAN Jiale, XU Qingqiang, SONG Guobing, et al. Adaptive earth fault distance relay. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 54-58.

[6] 李岩,陈德树,尹项根,等.新型自适应姆欧继电器的研究.中国电机工程学报,2003,23(1):80-83.
LI Yan, CHEN Deshu, YIN Xianggen, et al. Study on the new adaptive mho relay. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 80-83.

[7] 朱声石.高压电网继电保护原理与技术.北京:中国电力出版社,2005.
ZHU Shengshi. The theory and technology of power system protection. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

[8] 刘世明,陶惠良,杨春明.两种新型故障分量电抗继电器.中国电机工程学报,2001,21(4):88-91.
LIU Shiming, TAO Huiliang, YANG Chunming. Two new earth-fault reactance relays based on fault-component. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 88-91.

[9] 邰能灵,林韩,陈金祥,等.改进的比幅式工频变化量距离继电器方案.电力系统自动化,2006,30(9):56-60.
TAI Nengling, LIN Han, CHEN Jinxiang, et al. A new improved fault component distance relay based on voltage amplitude comparison. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 56-60.

[10] HA Hengxu, ZHANG Baohui. Study on reactance relays for single phase to earth fault on EHV transmission lines// Proceedings of 2004 International Conference on Power System Technology: Vol 1, Nov 21-24, 2004, Singapore: 1-5.

黄少锋(1958—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统微机保护。

刘千宽(1967—),男,博士研究生,研究方向为电力系统微机保护。E-mail: liuqiankuan@sina.com

柳焕章(1954—),男,高级工程师,主要从事电力系统继电保护研究、运行管理和整定计算。

(下转第 45 页　continued on page 45)

（上接第 41 页 continued from page 41）

Adaptive Distance Relay with Combined Polarizing Quantity Based on Compensated Voltage

HUANG Shaofeng[1], *LIU Qiankuan*[1], *LIU Huanzhang*[2], *LI Yongbing*[1]

（1. Key Lab of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China）

（2. Huazhong Electric Power Dispatch & Communication Center, Wuhan 430077, China）

Abstract: Mho relay usually takes a single voltage as polarizing voltage such as positive sequence voltage. In this way, its operating boundary is fixed and operating characteristic cannot adapt to fault resistance. To enhance the adaptive capability against fault resistance, a second voltage quantity changing with fault resistance should be introduced to form a composite vector of multiple polarizing voltages that is able to track the trajectory of fault resistance. Hence this paper proposes a new composite polarizing voltage consisted of a part of compensated voltage and the primary polarizing voltage that is the pre-fault voltage at the location of the setting impedance. To overcome transient overreaching problem, a part of the primary polarizing voltage is also introduced to the compensated voltage to adjust the protective zone to fault clock. The paper investigates the operating characteristics of the adaptive distance relay in the voltage plane and the impedance plane. The performance of the relay has been demonstrated on a two-source 500 kV system with 300 km line. Theoretical analysis and simulation show that the relay has good resistive tolerance.

Key words: distance relay; high resistance; circular characteristics; line protection