

# 关于工频变化量距离保护可靠性的研究

徐妍<sup>1</sup>, 陆广香<sup>1</sup>, 徐晓敏<sup>2</sup>, 陈中<sup>1</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 淮安市电力公司, 江苏 淮安 223002)

**摘要:** 在实际工作中, 工频变化量距离保护继电器的动作特性会受到保护线路的影响。从工频变化量保护的基本特性出发, 具体分析了以下两种情况: 当保护背后线路含等效容性阻抗元件时, 影响系统的测量阻抗, 使得保护距离缩短, 导致工频变化量继电器的误动作; 当线路发生短路故障时, 因限流器投入系统而增加的额外阻抗值不仅会影响到工频变化量继电器的测量阻抗值, 也会影响到继电器的固有特性, 从而导致继电器的误动作。并提出了通过改变整定值的方法来解决误动的方案。

**关键词:** 工频变化量; 距离保护; 容性阻抗; 故障限流器; 动作特性

## Research on the reliability of the distance protection using power frequency variable components

XU Yan<sup>1</sup>, LU Guangxiang<sup>1</sup>, XU Xiaomin<sup>2</sup>, CHEN Zhong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Huai'an Power Company, Huai'an 223002, China)

**Abstract:** In practical work, the frequency variation distance protection relay operating characteristics will be impacted by the protection circuit. On the base of the characteristics of the frequency variation protection, this paper analyses the two situations: when there is an equivalent capacitive impedance which is put into the protection's opposite direction, the system measured impedance will be affected, so that the protection distance is shortened, which will cause the malfunction of the distance protection using power frequency variable components; when there is a short-circuit in the line, the fault current limiter can limit the current lever, but the additional impedance values which brought in by the fault current limiter will not only affects the measurement of the impedance of the relay, but also affects the characteristics of the relay, which will also cause the malfunction of the relay. And a solution of malfunction by resetting the value of setting impedance is offered.

**Key words:** power frequency variable components; distance protection; capacitive impedance; fault current limiter; operating characteristics

中图分类号: TM773; TM761

文章编号: 1674-3415(2015)20-0051-07

## 0 引言

故障限流器(Fault Current Limiter, FCL)早在上世纪70年代就出现在国内外文献中,但其真正受到重视和快速发展是在柔性交流输电技术被提出以后<sup>[1-3]</sup>。从近几十年的发展历程来看,虽然FCL种类繁多,且结构形式不同,但其工作原理基本类似:在电网正常运行时表现为零阻抗或微小阻抗,功耗接近于零;在电网发生短路故障时,迅速呈现高阻抗以限制故障电流。近年来,国内外在限流器的研制方面取得了令人瞩目的成果,其中超导型、电力电子型和基于常规设备的经济型FCL<sup>[4-10]</sup>是人们关注的热点,《超高压电网故障电流限制器关键技术与示范工程》是国家电网公司“十一五”重大科技项目<sup>[11]</sup>。

继电保护是电力系统的重要组成部分,它关系到电网的安全稳定。其中,我国学者提出的工频变化量距离保护具有较好的选相功能,并具有动作速度快、安全可靠、无需振荡闭锁等特性,在电力系统中得到了广泛的使用<sup>[12-14]</sup>。

本文重点研究了保护背后投入的容性阻抗和保护正方向投入的故障限流器对工频变化量距离保护的影响,并参考相关文献提出了解决误动的方案,为限流器引入电力系统打下基础,对今后电力系统的稳定运行具有积极的意义。

## 1 工频变化量继电器的工作原理

工频变化量继电器测量工作电压的工频变化量幅值,其工作原理实质上是一个简单的过压继电

器，这与常规的距离继电器有着本质的不同。其动作方程为<sup>[15]</sup>

$$|\Delta U_{op}| > U_z \quad (1)$$

式中： $\Delta U_{op}$  表示相应相(相间)工作电压  $U_{op}$  的变化量； $U_z$  为非故障状态下短路点电压。对于接地故障：

$$U_{op-\varphi} = U_{\varphi} - (I_{\varphi} + K \times 3I_0)Z_{zd}, \quad \varphi = A, B, C \quad (2)$$

对于相间故障：

$$U_{op-\varphi\varphi} = U_{\varphi\varphi} - I_{\varphi\varphi}Z_{zd}, \quad \varphi\varphi = AB, BC, CA \quad (3)$$

$Z_{zd}$  为整定阻抗，一般取线路正序阻抗的 80%~85%。 $K$  为零序电流补偿系数， $K = (Z_0 - Z_1)/(3Z_1)$ ， $Z_1$ 、 $Z_0$  分别为被保护线路单位长度的正序、零序阻抗。

线路正方向故障如图 1(a)所示。线路 MN 上，正方向 F 点发生金属性短路，F 点的电压降为 0。故障时，故障点电压可视为由两部分叠加而成，第一部分为正常运行时 F 点的电压；第二部分为与故障前 F 点电压数值相等而方向相反的电势  $\Delta E_f$ ，即相当于在故障分量网络中 F 点投入一个新的电源  $\Delta E_f$ 。母线 M 处安装保护装置，忽略过渡电阻，保护安装处的测量阻抗  $Z_m = Z_K$ ， $Z_K$  为短路点与保护安装处之间的线路阻抗， $Z_s$  为系统阻抗。

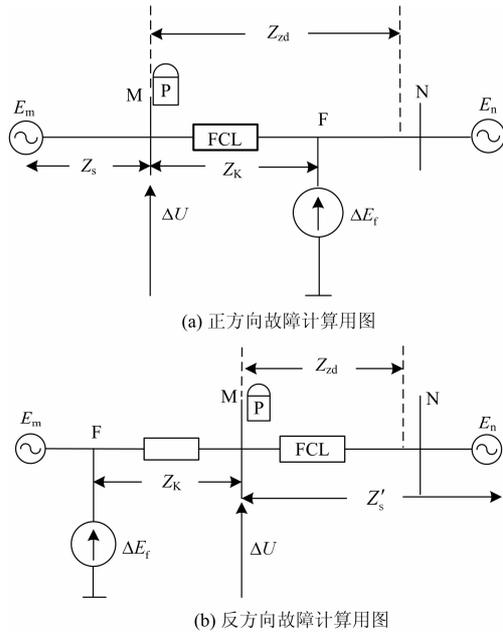


图 1 故障计算图

Fig. 1 Diagram of fault calculation

由工频故障分量距离元件的动作判据(1)得出正方向故障时动作特性方程为<sup>[15]</sup>

$$|Z_s + Z_{zd}| > |Z_s + Z_m| \quad (4)$$

上式在复平面上表现为以  $-Z_s$  为圆心， $|Z_s +$

$Z_{zd}|$  为半径的圆，正方向故障时继电器的动作特性如图 2 所示。当测量阻抗  $Z_m$  落入圆内时保护继电器动作。

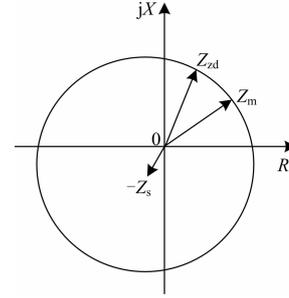


图 2 正方向故障时继电器动作特性

Fig. 2 Action area of relay when there is a fault in the positive direction

反向故障等效电路图如图 1(b)所示。保护背后 F 点发生故障， $Z'_s$  表示从保护安装处到对端系统中性点的等值阻抗。由式(1)得出反方向故障时动作特性方程为

$$|Z'_s - Z_{zd}| > |Z'_s - (-Z_m)| \quad (5)$$

上式在复平面上表现为以  $Z'_s$  为圆心， $|Z'_s - Z_{zd}|$  为半径的上抛圆，反方向故障时继电器的动作特性如图 3 所示。

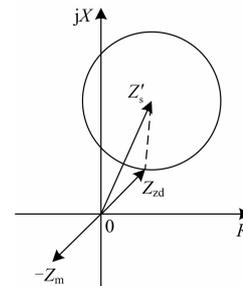


图 3 反方向故障时继电器动作特性

Fig. 3 Action area of relay when there is a fault in the opposite direction

## 2 线路背后等效容抗对继电器测量阻抗的影响

如果母线 M 背后含有容性元件，如高温超导电缆时，继电器的测量阻抗  $Z_m$  会受到容性阻抗的影响，有可能使测量阻抗落入阻抗圆的保护区域内部，导致误动。

由图 2 可以看出，正向故障时，动作特性包含很大的容抗和反向电阻区域，误动和拒动的可能性不大。以下主要分析线路背后空载投入超导电缆时继电器反向故障时的动作特性。

高温超导电缆在输电工程中对于线路增容和减少占地等具有实际意义, 在技术成熟稳定后可在电网中推广应用<sup>[16-17]</sup>。电抗型超导电缆因其单位长度电容较大, 考虑采用分布电容的 $\pi$ 型等效电路。超导电缆的 $\pi$ 型等效电路如图4所示。

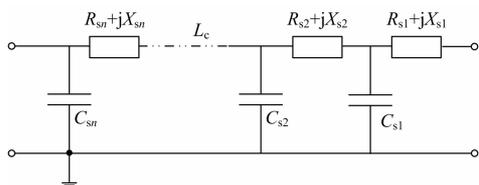


图4 超导电缆的 $\pi$ 型等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of  $\pi$  model of the superconducting cable

图中 $R_{s1}$ ,  $R_{s2}\dots R_{sn}$ 表示超导电缆单位长度的电阻值;  $X_{s1}$ ,  $X_{s2}\dots X_{sn}$ 为超导电缆单位长度的电抗值;  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}\dots C_{sn}$ 为超导电缆单位长度的电容值。

开关K闭合时, 超导电缆空载投入母线背后时的等效电路如图5所示, 图中 $R_s+jX_s$ 为 $\pi$ 型电路的等效阻抗,  $C_s$ 为等效容抗。

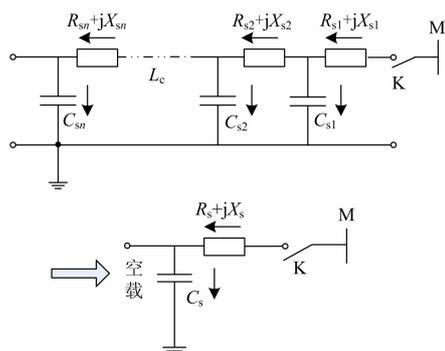


图5  $\pi$ 型电路的等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit of  $\pi$  model

结合电抗型超导电缆的分布参数特性, 考虑保护背后投入超导电缆的线路等效模型如图6所示。

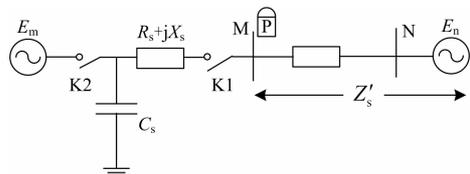


图6 背后超导电缆空载合闸系统图

Fig. 6 Equivalent circuit of the superconducting cable in the opposite direction

当开关K1合上、K2断开时, 将保护背后的超导电缆空载投入常规线路电力系统时, 超导电缆有别于常规线路的特性使得保护安装P处的测量阻抗在阻抗平面上的位置发生改变: 其单位长度电容值

较大使得投切时的测量阻抗落入阻抗平面的第二象限; 而其单位长度电阻值较小使得测量阻抗在第二象限向电抗轴靠近。所以, 对于工频变化量阻抗继电器而言, 原先的动作特性并不能够保证方向性, 极有可能发生误动。误动原因如图7所示。

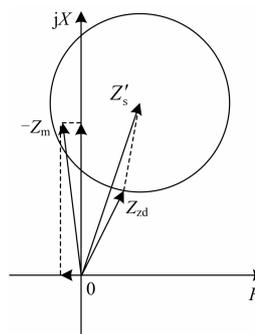


图7 投入超导电缆后动作特性

Fig. 7 Action area when the superconducting cable is put in the lines

由图7可以看出, 电抗型超导电缆的投入使得原本在第三象限的测量阻抗落入到第二象限, 并有可能落入阻抗圆, 因此会导致继电器误动。

### 3 故障限流器的投入导致继电器测量阻抗和特性圆的变化

当线路发生短路故障时, 故障限流器投入系统进行限流, 增加的额外电抗分量不仅会影响到工频变化量继电器的测量阻抗值, 也会影响到继电器的固有特性。

正方向故障时, 从图2可以看出, 继电器的动作特性包含了很大的容抗区域, 但是感抗区域较小。当限流器投在母线M右侧出口处, 如图1(a)所示。限流阻抗的投入会增加线路MN的阻抗值, 使得测量阻抗 $Z_m$ 增大。如图8, 令限流器的等效电抗为 $X_{fcl}$ , 限流器投入后线路的测量阻抗 $Z'_m = Z_m + X_{fcl}$ , 如果 $Z'_m$ 落在阻抗圆外, 即 $|Z_s + Z_{zd}| < |Z_s + Z'_m|$ , 则保护拒动。

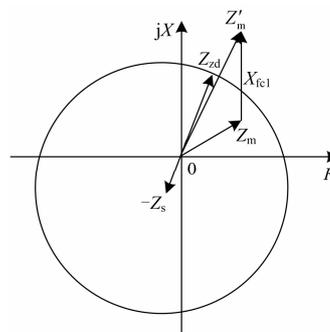


图8 FCL对测量阻抗的影响

Fig. 8 Influence of FCL on the measure impedance

在反向故障时,限流器仍投在母线 M 右侧出口处,如图 1(b)所示。限流阻抗的投入导致母线 M 右侧的阻抗  $Z'_s$  增大。设投入限流器后,从保护安装处到对端系统中性点的等值阻抗为  $Z''_s = Z'_s + X_{fc1}$ , 并形成了以  $Z''_s$  为圆心,  $|Z''_s - Z_{zd}|$  为半径的新阻抗圆,如图 9 中虚线圆所示,系统阻抗的变大导致了保护的動作范围变大。

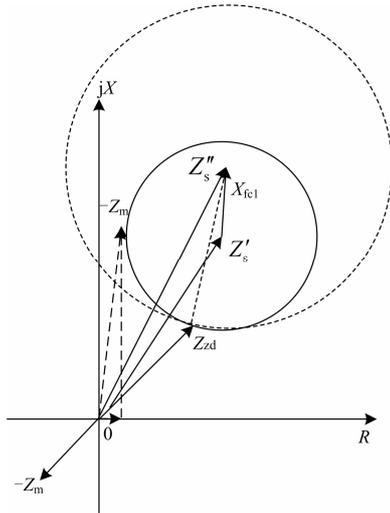


图 9 FCL 对特性圆的影响

Fig. 9 Influence of FCL on the action area

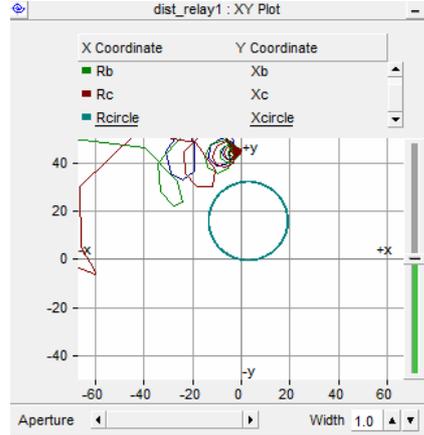
#### 4 线路背后等效容抗和限流器的投入导致保护误动

由图 9 可以看出,由于限流器的投入,使得新的阻抗圆保护范围变大,若保护背后没有容性阻抗,测量阻抗仍在第三象限。因此,尽管阻抗圆变大,也不会引起继电器发生误动。然而,若保护背后含有等效容性元件,例如保护背后并联有静止无功发生器 SVG 时,由于 SVG 的负阻特性,使得测量阻抗向 R 轴正方向移动,又由于 SVG 进行无功补偿时所呈现出的容性特性,使得测量阻抗沿着纵轴正方向落入第一或第二象限,如图 9 中虚线所示。此时若线路发生短路故障使得限流器投入运行,就有可能导致测量阻抗落入新的阻抗圆内,从而导致反方向故障时继电器误动。相比较于图 7,由于限流器的投入导致继电器的动作区域变大,所以误动的可能性也更大。

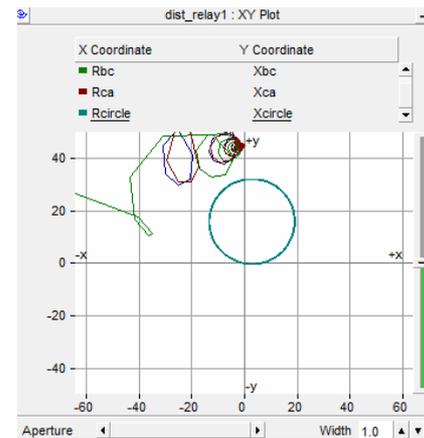
#### 5 误动仿真

仿真验证限流器和超导电缆投入会引起工频变化量继电器误动作,仿真分析图如图 6 所示,当开关 K1 合上、K2 断开时,设定常规线路长度为

100 km,保护背后超导电缆长度分别为 100 km、150 km、200 km、250 km。在  $t=0.1$  s 时,限流器和超导电缆  $L_M$  投入系统运行,观察保护安装处的工频变化量继电器动作特性,如图 10~图 13 所示。



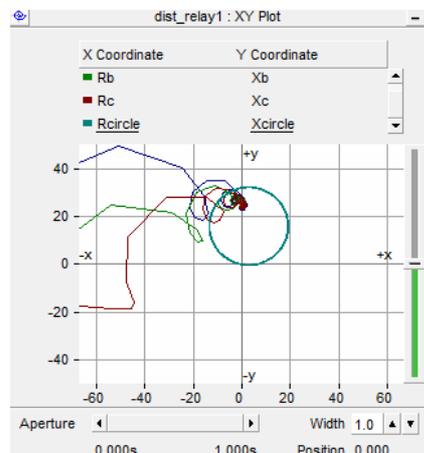
(a)



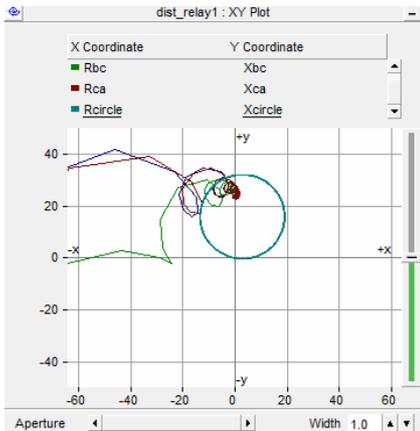
(b)

图 10  $L_M=100$  km 时单相(a)和两相(b)测量阻抗轨迹

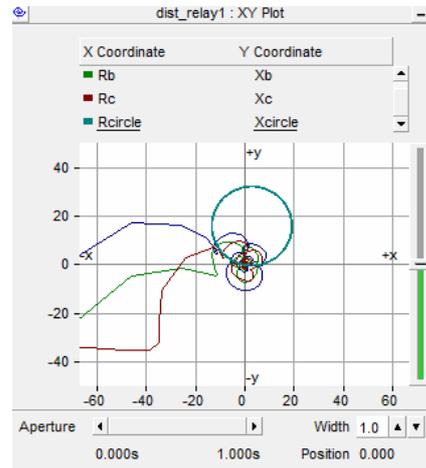
Fig. 10  $L_M=100$  km (a) single-phase and (b) two-phase measuring impedance locus



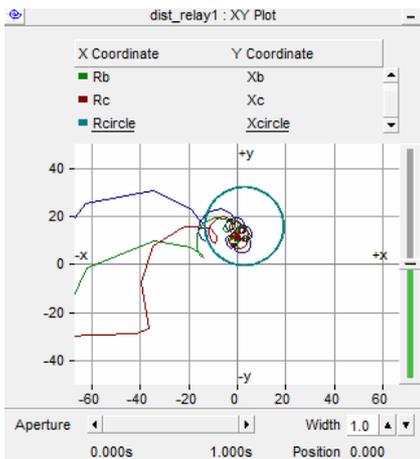
(a)



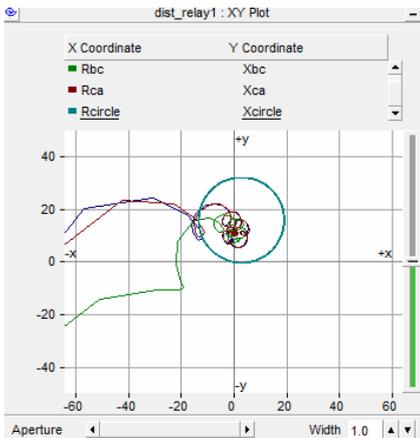
(b)

图 11  $L_M=150$  km 时单相(a)和两相(b)测量阻抗轨迹Fig. 11  $L_M=150$  km (a) single-phase and (b) two-phase measuring impedance locus

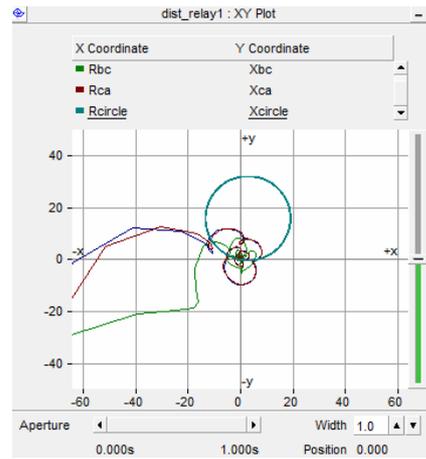
(a)



(a)



(b)

图 12  $L_M=200$  km 时单相(a)和两相(b)测量阻抗轨迹Fig. 12  $L_M=200$  km (a) single-phase and (b) two-phase measuring impedance locus

(b)

图 13  $L_M=250$  km 时单相(a)和两相(b)测量阻抗轨迹Fig. 13  $L_M=250$  km (a) single-phase and (b) two-phase measuring impedance locus

图 10~图 13 显示了超导电缆长度不同时, 单相和两相测量阻抗的轨迹。图中蓝色的圆表示工频变化量继电器的动作圆, 当超导电缆在 150~250 km 时, 测量阻抗将落入阻抗圆, 保护将发生误动。可见, 适当选取超导电缆的长度, 则可避免继电器的误动。

## 6 防止误动的方法

当保护背后含有等效容抗, 系统的测量阻抗可能落入动作圆中, 从而可能引起继电器反方向故障时的误动。由于反方向动作圆的半径为  $|Z'_s - Z_{zd}|$ , 所以考虑增大整定值  $Z_{zd}$ , 通过缩小动作区域来降低误动可能性。如果整定值按从保护安装处到对端系统中性点阻抗  $Z'_{zd} = Z'_s$  整定, 在反方向故障时其动作特性为一个点, 如图 14 中虚线圆 2 所示, 所以不会引起误动<sup>[18]</sup>。

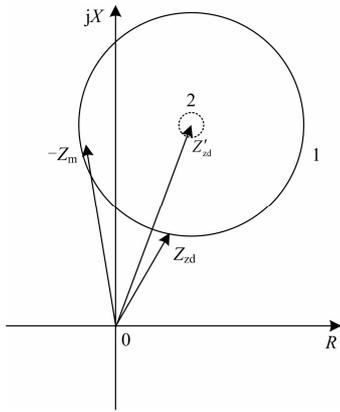


图 14 线路背后有容性阻抗时防反方向误动保护特性图

Fig. 14 Action area of anti the protection's opposite direction's mal-fuction when the capacitive impedance put into the protection's opposite direction of regular lines

在此基础上，当线路中的限流器因发生故障而投入使用时，本线路中投入的限流器使得原本缩小了的阻抗圆的半径变成了 $|Z'_s - Z'_s|$ ，如图 15 中虚线圆 3 所示。测量阻抗仍有可能进入到变大了的特性圆中，可能会引起工频变化量继电器在反方向故障时的误动。

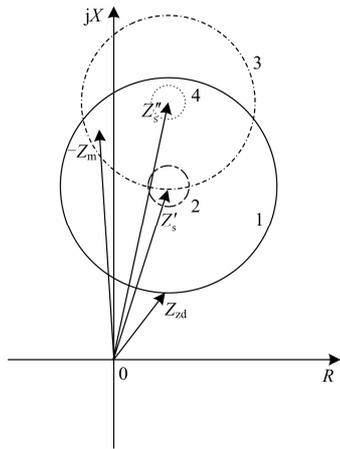


图 15 防反方向误动保护特性图

Fig. 15 Action area of anti the protection's opposite direction's mal-fuction

从以上分析可知，当整定值较小时，继电器在反方向故障时可能误动。所以考虑进一步增大整定值 $Z'_zd$ ，若整定值按从保护安装处到对端系统中性点阻抗(此时包含限流器阻抗) $Z''_zd = Z'_s$ 整定，则反方向故障时其动作特性为一个点，则不会误动，如图 15 中虚线圆 4 所示；而正方向故障时动作特性圆的半径变成了 $|Z'_s + Z''_zd|$ ，如图 16 中虚线圆所示。

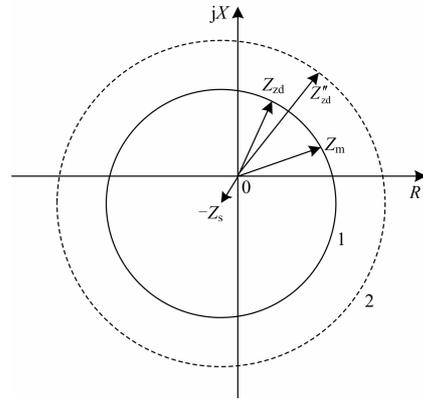


图 16 正向保护特性图

Fig. 16 Action area of positive direction

图 17 中，实线为未加入超导电缆和超导限流器时的 $\Delta U_{op}$ 。显然，此时 $\Delta U_{op} < U_{set}$ ，继电器不会动作；虚线为加入超导电缆和超导限流器，此时 $\Delta U_{op}$ 已经超出 $U_{set}$ ，距离继电器发生误动。通过设置适当的整定值，既可防止反方向故障的误动，又可保证在正方向故障时仍能够保持原来的动作区域，可有效防止此类误动。

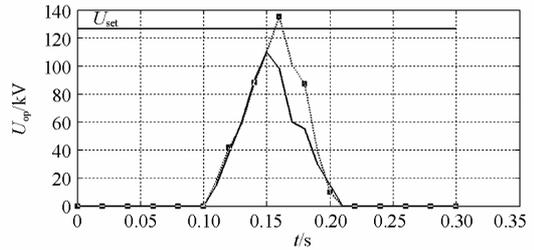


图 17 仿真分析图

Fig. 17 Simulation analysis chart

## 7 总结

以上分析表明了背后等效容性阻抗及限流器的投入对工频变化量距离保护的方向性产生了影响，可能会引起工频变化量继电器的误动。依据一些相关的参考文献提出了解决误动的方案，理论上可有效地解决此类误动。

## 参考文献

- [1] KING H J, GALLAGHER H E, KNAUER W. 145 kV current limiting device-design, construction and factory test[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(3): 911-918.
- [2] LEE L, CARBERRY R, KNAUER W, et al. An ultrafast fault sensor for a fault current limiting device[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 98(3): 1069-1079.
- [3] CALLAGHER H E, CARBERRY R, KING H J, et al.

- 145 kV current limiting device-field test[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(1): 69-77.
- [4] KCILIN V, KOVALCV I, KMGLOV S, et al. Model of HTS three-phase saturated core fault current limiter[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2000, 10(1): 836-839.
- [5] 刘凯, 陈红坤, 林军, 等. 故障限流器在电力系统中应用研究现状[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 147-151.  
LIU Kai, CHEN Hongkun, LIN Jun, et al. Study situation of applications of fault current limiter in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 147-151.
- [6] 何熠, 吴爱国, 信赢, 等. 饱和铁心型超导限流器故障电流快速模式识别[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 81-87.  
HE Yi, WU Aiguo, XIN Ying, et al. Rapid pattern recognition of fault current for HTS three-phase saturated iron core fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 81-87.
- [7] 金鑫, 江道灼. 并联补偿电容对限流器运行影响的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 54-57.  
JIN Xin, JIANG Daozhuo. Simulation research on the effect of the paralleled compensating capacitor on the solid state fault current limiter operation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 54-57.
- [8] 张晚英, 周有庆, 赵伟明, 等. 改进桥路型高温超导故障限流器的实验研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 70-76.  
ZHANG Wanying, ZHOU Youqing, ZHAO Weiming, et al. Experiment research on an improved rectifier type high temperature superconducting fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 70-76.
- [9] 褚建峰, 孟向军. 直流 SMC 铁心高温超导故障限流器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 59-63.  
CHU Jianfeng, MENG Xiangjun. Study of DC high temperature superconducting fault current limiter using soft magnetic composites[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 59-63.
- [10] 刘牙朋, 江道灼, 莫育杰, 等. 限流式 UPFC 中 UPFC 模块与限流器模块的交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 36-42.  
LIU Yapeng, JIANG Daozhuo, MO Yujie, et al. Analysis of interaction between unified power flow controller module and fault current limiter module[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 36-42.
- [11] 王琦. 世界首台 500 千伏短路限流器在华东投运[N]. 国家电网报, 2009, 12-26(1).  
WANG Qi. The world's first 500 kV short current limiter operation in eastern China[N]. State Grid News, 2009, 12-26(1).
- [12] 沈国荣, 郑玉平, 赵希才. 继电保护技术的研究与应用[J]. 电力设备, 2003(5): 5-9.  
SHEN Guorong, ZHENG Yuping, ZHAO Xicai. Research and application of protection technology[J]. Electrical Equipment, 2003(5): 5-9.
- [13] 姚旭, 何方明, 索南加乐, 等. 工频变化量距离元件一些问题的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 78-83.  
YAO Xu, HE Fangming, SUONAN Jiale, et al. Some discussion on the fault component distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 78-83.
- [14] 徐岩, 林旭涛, 赵亮, 等. 大型风电场对工频故障分量距离保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 118-125.  
XU Yan, LIN Xutao, ZHAO Liang, et al. Research on impact of large wind farms on distance relay using power fault component[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 118-125.
- [15] 沈国荣. 工频变化量距离继电器研究[C] // 江苏电机工程学会第四次全国继电保护及安全自动装置学术会议, 1986.  
SHEN Guorong. A new distance relay based on the variation of power frequency components[C] // Proceedings of the 4th Conference on Relay Protection of CSEE, 1986.
- [16] 杨勇. 超导技术的发展及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 48-60.  
YANG Yong. Development of superconducting technique [J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 48-60.
- [17] 信赢. 超导电缆技术的发展及应用前景[J]. 新材料产业, 2004(7): 49-53.  
XIN Ying. Superconducting cables technology development and application prospects[J]. Advanced Materials Industry, 2004(7): 49-53.
- [18] 郑玉平. 串补线路继电保护的研究与同杆双回线继电保护及重合闸的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.  
ZHENG Yuping. Study of protective relay on series capacitor compensated lines & study of protective relay and reclosure on double-circuit lines on the same pole[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.

收稿日期: 2015-01-12; 修回日期: 2015-07-21

作者简介:

徐妍(1987-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: njupt-xuyan@163.com

陆广香(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护方面的研究;

徐晓敏(1984-), 男, 主要从事电网的运营与监测工作。

(编辑 魏小丽)