

新型多功能固态限流器对 0° 接线方式的影响及其解决办法

涂春鸣¹, 邓树¹, 郭成², 帅智康¹, 姜飞¹

(1. 国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学), 湖南 长沙 410082; 2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650217)

摘要: 固态限流器通过在线路中串入等效阻抗实现限流, 这势必对系统距离保护产生不良影响。以新型多功能固态限流器为例, 分析了固态限流器接入系统对反映相间短路故障 0° 接线方式的影响, 提出了一种消除等效限流阻抗影响的接线方式。利用PSCAD/EMTDC对比分析了采用所提出接线方式和不采用的两种情况下, 系统不同位置发生相间短路故障时距离保护继电器的动作特性。仿真结果表明: 所提方法消除了固态限流器对继电器测量阻抗的影响, 保证了继电器动作的可靠性。

关键词: 固态限流器; 距离保护; 相间短路; 接线方式; 测量阻抗

Impact of multi-function solid state fault current limiter on 0° wiring mode and its solution method

TU Chunming¹, DENG Shu¹, GUO Cheng², SHUAI Zhikang¹, JIANG Fei¹

(1. National Electric Power Conversion Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Yunnan Electric Power Test & Research Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: SSFCL limits the short-circuit fault current by adding equivalent impedance in series in line which is bound to have a negative impact on distance protection. Taking the multi-function solid state fault current limiter (MSSFCL) for an example, the impact of solid state fault current on 0° wiring mode is analyzed. And a new wiring mode for eliminating the impact of limiting impedance equivalent is proposed. The operating characteristics of the relay of distance protection under the two wiring modes are analyzed by PSCAD/EMTDC when different inter-phase short-circuit faults happen at different locations. The simulation results demonstrate that the proposed new wiring mode can effectively eliminate the impact of limiting reactance on measured impedance and ensure the reliability of the relay action.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377051).

Key words: SSFCL; distance protection; inter-phase short circuit; wiring mode; measured impedance

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0081-06

0 引言

距离保护作为保护电力系统安全稳定运行的重要手段, 是通过测量故障点至保护安装地点之间的距离大小, 实现保护动作的一种装置。而固态限流器是通过在输电线路中串入等效阻抗来限制短路电流。因此研究固态限流器对距离保护所造成的影响, 对其在电力系统中的推广应用具有很大的现实意义。目前大多数以电力电子器件为基础的固态限流器^[1-3]在系统未发生短路故障情况下呈现低阻抗, 对系统的影响很小; 但是当系统发生短路故障后, 它

们能够迅速的将限流阻抗串入系统以实现短路限流的目的。因此发生短路故障后限流阻抗的串入改变了线路原来的阻抗分布特性, 对继电保护尤其是距离保护产生了很大的影响^[4-5], 这可能导致阻抗继电器误动作或者拒动^[6]。国内外学者对此也进行了许多研究, 并提出了多种解决办法。文献[7]对距离保护的整定阻抗进行了重新整定; 文献[8]针对单相接地短路故障下提出了一种新型阻抗继电器接线方式; 文献[9-10]提出了针对不同情况下接地距离保护的补偿算法。但是上述研究大多阐述了针对单相接地短路故障的解决办法, 少有提及固态限流器对相间短路故障下距离保护测量阻抗的影响。

本文以新型多功能固态限流器(Multi-Function

Solid State Fault Current Limiter)为例,分析了固态限流器在不同相间短路故障下对继电器 0° 接线方式的影响;并提出了一种消除固态限流器限流等效阻抗对继电器测量阻抗影响的新型阻抗继电器接线方式;最后利用 PSCAD/EMTDC 软件对两种接线方式下的继电器动作特性进行了仿真研究,仿真结果证明了本文提出的新型接线方式的有效性,该接线方式能够满足距离保护的要求并消除限流器对测量阻抗的影响。

1 MSSFCL 工作原理

新型多功能固态限流器的拓扑结构如图 1 所示。其中: U_s 为电源电压; U_C 为串联变压器端电压,其参考方向与 U_s 一致; Z_s 为电源等效阻抗; T_s 为并联变压器,其变比为 $n:1$; R_1 为并网电阻; L_0 为并联变换器滤波电感; C_{dc} 为直流储能电容; R_2 为放电电阻; L 为串联变换器输出滤波器电感; C 为串联变换器滤波电容; D_1 为双向晶闸管; T_1 为串联变压器,其变比为 $k:1$; Z_{line} 为线路等效阻抗。

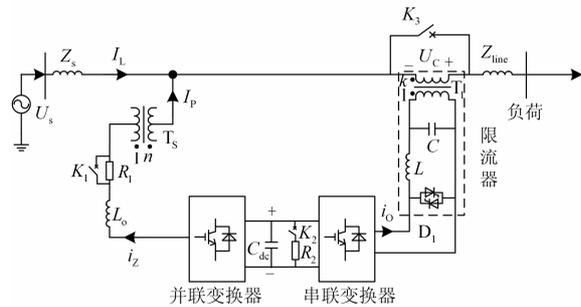


图 1 MSSFCL 主拓扑结构
Fig. 1 Topological structure of MSSFCL

当系统电压发生跌落时,此时双向晶闸管处于截止状态, MSSFCL 等效为 DVR^[11-13],通过改变逆变器输出电压 U_C 就能够实现负载电压的动态补偿,维持负载电压不变。

当系统发生短路故障后,控制系统检测到短路故障后迅速发出短路故障信号;该信号会立即封锁串联变换器的 IGBT,同时经过死区延迟后导通双向晶闸管 D_1 ,将串联变换器输出滤波器通过串联变压器耦合到线路中,限制短路电流。因为并联变换器与串联变换器此时不发生能量的交换,因此并联变换器的输出电流 i_z 很小,耦合到高压侧电流 i_p 也很小,因此可以将限流器与整流器看成两个单独的部分;同时串联变换器输出滤波器中电容支路对基波阻抗很大,因此忽略电容支路,将输出滤波器看成一个纯电感 L ,将其阻抗等效到串联变压器一次侧,则系统短路电流为

$$I_L = \frac{U_s}{Z_s + k^2 \omega_0 L + Z_1} \quad (1)$$

式中: Z_s 为电源阻抗; Z_1 为线路阻抗; $k^2 \omega_0 L$ 为 MSSFCL 的限流等效阻抗。

针对 MSSFCL 在 10 kV 配网中应用的相关工作已经开展,但是更高电压等级的输电网中的应用还未开始,但随着大功率电力电子器件技术逐步突破和多电平、多重化、H 桥级联、模块化多电平等电力电子拓扑技术的快速发展,电力电子设备的耐压、耐流水平将不断提高,有望在不久的将来实现工程应用。同时,大功率电力电子器件耐压水平的不断提高和 VSC-HVDC 与高压 STATCOM 等电力电子系统在高压电网的逐步应用和成熟,都为 MSSFCL 在高压等级电网中的工程应用提供了技术支撑和可行途径。

2 MSSFCL 对 0° 接线方式的影响及其解决办法

对于反应相间短路故障的距离继电器接线方式可分为 0° 接线, 30° 接线以及 -30° 接线。因为相间短路距离继电器的 30° 接线方式和 -30° 接线方式在实际中应用很少,而 0° 接线方式是应用最广泛的,因此本文只分析限流器对相间短路距离继电器 0° 接线方式的影响。采用 0° 接线方式中各继电器上所加的电压 U_j 和电流 I_j 通常为

$$\begin{cases} U_{JA} = U_{AB}, I_{JA} = I_A - I_B \\ U_{JB} = U_{BC}, I_{JB} = I_B - I_C \\ U_{JC} = U_{CA}, I_{JC} = I_C - I_A \end{cases} \quad (2)$$

当限流器位于距离保护安装点下游时,会改变线路的阻抗分布特性^[14],因此本文将详细分析 MSSFCL 位于继电器下游时在不同相间短路故障下对距离保护 0° 接线方式的影响。

由式(1)可知 MSSFCL 在系统发生短路故障后其等效阻抗为

$$Z_{FCL} = k^2 \omega_0 L \quad (3)$$

当系统发生两相短路故障后,以 AB 两相发生短路故障为例,此时系统等效电路如图 2(a)所示。系统电流为

$$\begin{cases} I_A = -I_B \\ I_C = 0 \end{cases} \quad (4)$$

系统电压为

$$\begin{cases} U_{AB} = I_A (2Z_{FCL} + 2kZ_1) \\ U_{AB} = -I_B (2Z_{FCL} + 2kZ_1) \end{cases} \quad (5)$$

式中: Z_1 为线路阻抗; k 为短路故障发生点到距离

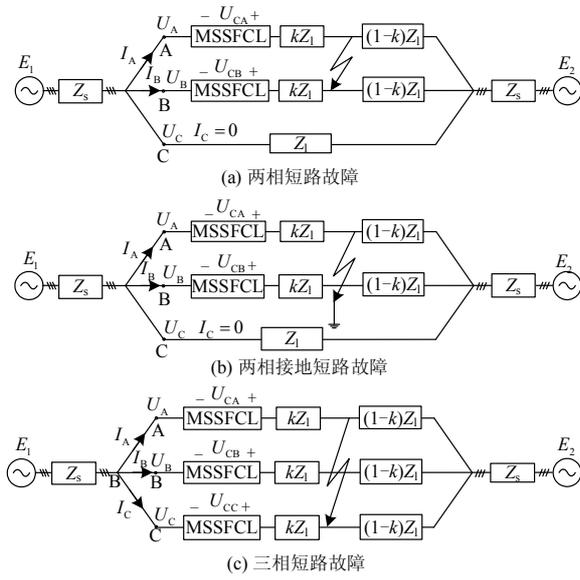


图 2 相间短路故障系统等效电路图

Fig. 2 System equivalent circuit under inter-phase short circuit fault

保护安装点线路长度所占线路总长百分比。

联立式(3)、式(4)可以得到继电器的测量阻抗为

$$Z_{K1}^{(2)} = \frac{U_{AB}}{I_A - I_B} = kZ_1 + Z_{FCL} \quad (6)$$

同理当系统发生两相接地短路故障时如图 2(b)所示, 忽略从大地回流的电流^[14], 那么继电器测量阻抗的分析方法同上, 此时继电器的测量阻抗仍为

$$Z_{K1}^{(1,1)} = kZ_1 + Z_{FCL} \quad (7)$$

当系统发生三相短路故障时, 则系统等效电路图如图 2(c)所示。因为三相短路时三相是对称的, 因此只分析其中一个继电器即可。由图 2(c)可知, 短路故障发生后距离保护安装点到短路故障点的电压 U_{AB} 应为

$$U_{AB} = I_A(kZ_1 + Z_{FCL}) - I_B(kZ_1 + Z_{FCL}) = (I_A - I_B)(kZ_1 + Z_{FCL}) \quad (8)$$

此时继电器的测量阻抗为

$$Z_{K1}^{(3)} = \frac{U_{AB}}{I_A - I_B} = kZ_1 + Z_{FCL} \quad (9)$$

由式(6)、式(7)以及式(9)可知, 无论系统发生何种相间短路故障, 继电器的测量阻抗都会受到 MSSFCL 的影响, 测量阻抗的增大缩短了距离保护的范。因此为了保证距离保护继电器动作的可靠性, 必须要消除 MSSFCL 限流等效阻抗对继电器测量阻抗的影响。由前面的分析可知, MSSFCL 接入系统中, 继电器的测量阻抗为

$$Z_{JA} = \frac{U_{AB}}{I_A - I_B} = kZ_1 + Z_{FCL} \quad (10)$$

那么有

$$U_{AB} = (I_A - I_B)kZ_1 + (I_A - I_B)Z_{FCL} = (I_A - I_B)kZ_1 + I_A Z_{FCL} - I_B Z_{FCL} \quad (11)$$

由图 2(c)可知, 短路故障下 MSSFCL 限流等效阻抗的端电压为

$$\begin{cases} U_{CA} = -I_A Z_{FCL} \\ U_{CB} = -I_B Z_{FCL} \end{cases} \quad (12)$$

联立式(11)、式(12)有

$$U_{AB} = (I_A - I_B)Z_1 + (U_{CB} - U_{CA}) \quad (13)$$

若此时将加入继电器的电压改变如下, 电流不变

$$U_{JA} = U_{AB} + (U_{CA} - U_{CB}) \quad (14)$$

那么此时继电器的测量阻抗为

$$Z_{JA} = \frac{U_{AB} + (U_{CA} - U_{CB})}{I_A - I_B} = kZ_1 \quad (15)$$

由式(15)可知此时继电器的测量阻抗刚好是短路故障点到距离保护安装点的线路阻抗。因此, 阻抗继电器的三相接线方式可以更改为

$$\begin{cases} U_{JA} = U_{AB} + (U_{CA} - U_{CB}), & I_{JA} = I_A - I_B \\ U_{JB} = U_{BC} + (U_{CB} - U_{CC}), & I_{JB} = I_B - I_C \\ U_{JA} = U_{CA} + (U_{CC} - U_{CA}), & I_{JA} = I_C - I_A \end{cases} \quad (16)$$

式(16)即为本文提出的新型接线方式, 它能正确测量短路故障点到保护安装地点的线路阻抗值并消除 MSSFCL 限流等效阻抗 Z_{FCL} 对测量阻抗的影响, 保证了阻抗继电器动作的可靠性; 同时系统电压发生跌落或正常运行状态下对距离保护继电器的正确动作不产生影响。

3 仿真验证

本文采用 PSCAD/EMTDC 软件搭建了仿真模型, 系统模型如图 3 所示。由前面的分析可知, 无论发生哪种相间短路故障, 0° 接线方式下的测量阻抗均为故障线路阻抗与限流器阻抗构成, 因此本文以 A、B 两相接地短路故障为例验证本文提出的新型继电器接线方式的正确性。其中系统各元参数如下。

a. 电源: 线电压 110 kV, 频率 50 Hz, 两电源初相角分别为 $\Phi_1=0^\circ$ 、 $\Phi_2=20^\circ$, 两电源内阻均为 $R=6.287 \Omega$ 、 $L=68.15 \text{ mH}$ 。

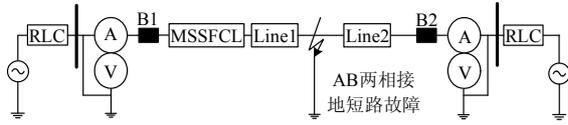


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

b. 架空线路：输电线路 Line1 和 Line2 全长为 100km，正序阻抗值为 $Z_1=0.03575+j0.50776 \Omega/\text{km}$ 。

c. 故障类型：0.2 s 发生 A、B 两相永久性接地短路故障。

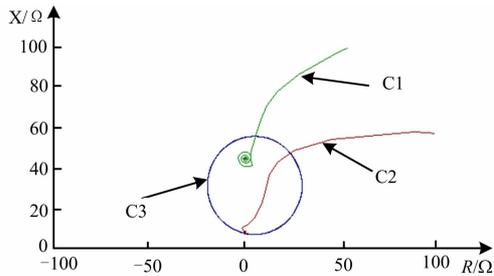
d. 整定阻抗：为便于比较两种接线方式下的动作特性，本文整定阻抗值为全部线路的阻抗。

e. 断路器：本文只分析断路器 B1 的动作情况，因此 B2 不动作。

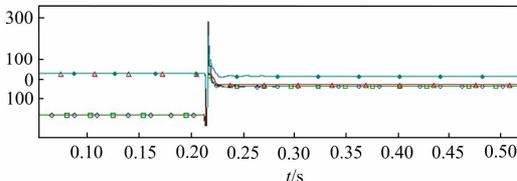
下面分别采用 0° 接线方式以及本文所提出的新型接线方式，以 A、B 两相发生接地短路故障为例，对本文所提接线方式的有效性进行仿真验证。短路故障点分别距 MSSFCL 出口端 10 km、50 km 以及 80 km 处。

3.1 Line1=10 km 处 A、B 两相接地短路故障

如图 4 所示，为 Line1=10 km 处发生 A、B 两相接地短路故障时两种接线方式下的阻抗特性曲线以及短路故障前后的基波阻抗曲线。图 4(a)中 C1 为 0° 接线方式下的阻抗特性曲线，C2 为本文提出的新型接线方式下的阻抗特性曲线，C3 为动作特性圆。可以看出，当发生短路后，曲线 C1 落入曲线



(a) 两种接线方式下阻抗特性曲线



(b) 两种接线方式下基波阻抗故障前后变化曲线

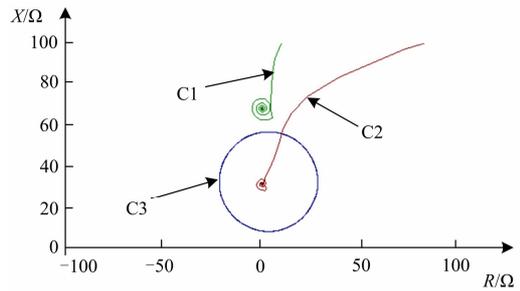
图 4 Line1=10 km 时两种接线方式下的测量阻抗

Fig. 4 Measured impedance under the two kinds of wiring modes (Line1=10 km)

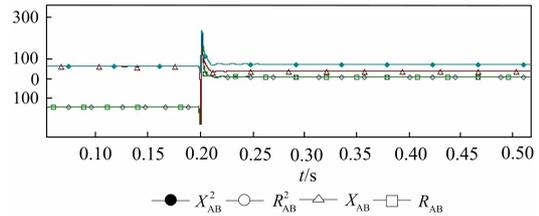
C3 中，继电器能够正确动作；曲线 C2 在短路故障发生后也落入曲线 C3 中，继电器也可以正确动作。

3.2 Line1=50 km 处 A、B 两相接地短路故障

如图 5 所示，为 Line1=50 km 处发生 A、B 两相接地短路故障时两种接线方式下的阻抗特性曲线以及短路故障前后的基波阻抗曲线。图 5(a)中，C1 曲线在短路故障发生后没有落入动作特性圆 C3 中，因此继电器不能够正确动作；而此时 C2 曲线在短路故障发生后仍落入 C3 中，继电器能够正确动作切除故障线路。



(a) 两种接线方式下阻抗特性曲线



(b) 两种接线方式下基波阻抗故障前后变化曲线

图 5 Line1=50 km 时两种接线方式下的测量阻抗

Fig. 5 Measured impedance under the two kinds of wiring modes (Line1=50 km)

3.3 Line1=80 km 处 A、B 两相接地短路故障

如图 6 所示为 Line1=80 km 处发生 A、B 两相接地短路故障时两种接线方式下的阻抗特性曲线以及短路故障前后的基波阻抗曲线。图 6(a)中， 0° 接线方式下的测量阻抗 C1 曲线落在动作特性圆 C3 曲线外；而线路末端发生短路故障时 C2 曲线依然落在 C3 曲线内。

根据仿真分析可知，当系统采用 0° 接线方式时，在线路出口端发生短路故障时继电器能够正确动作并切除故障线路；当在线路中、末端发生短路故障时， 0° 接线方式已经不能满足距离保护的要求，其保护的线路范围受限流装置的影响已经大大缩小，该接线方式下的距离保护范围受限流装置的等效限流阻抗影响。当继电器采用本文提出的新型接线方式，在线路 10 km、50 km 以及 80 km 处发

生短路故障时, 继电器都能够正确动作, 其保护的线路范围接近线路全长, 很好地消除了限流装置对继电器测量阻抗的影响, 满足了距离保护的要求。

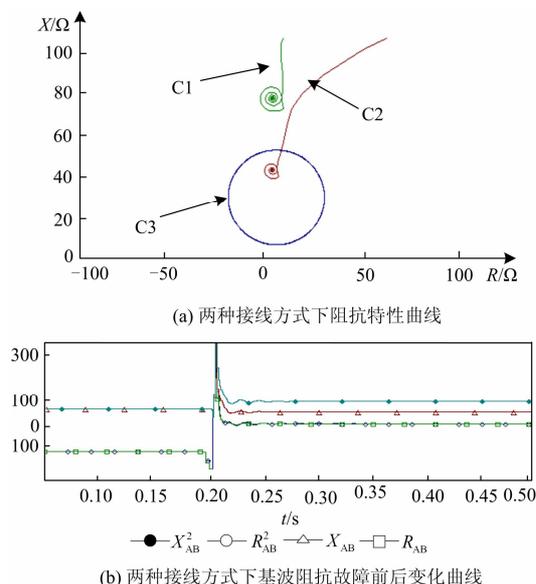


图 6 Line1=80 km 时两种接线方式下的测量阻抗
Fig. 6 Measured impedance under the two kinds of wiring modes (Line 1=80 km)

4 结论

当系统发生短路故障后, 以电力电子为基础的固态限流器接入系统将改变继电器的测量阻抗, 使得原有距离保护的保护区发生改变。当继电器继续采用 0° 接线方式时, 线路末端发生短路故障时继电器可能造成不正确动作。

以新型多功能固态限流器为例, 本文提出一种新型阻抗继电器接线方式, 能够很好地克服限流等效阻抗对继电器测量阻抗的影响, 保证原有继电器动作的可靠性。此外, 该方法对其他类型限流器同样具有参考价值。

参考文献

[1] 潘艳霞, 凌志斌, 蔡旭, 等. 新型磁控开关型故障限流器参数设计及模型机研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 59-64.
PAN Yanxia, LING Zhibin, CAI Xu, et al. Study on parameter design and test model of a novel magnetic-controlled switcher type fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 59-64.

[2] ABRAMOVITZ A, SMEDLEY K M. Survey of solid state fault current limiters[J]. Power Electronics, 2012,

27(6): 2770-2782.

- [3] 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 application of fault current limiter in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 147-151.
- [4] 宋国兵, 褚旭, 康小宁, 等. 分布模型参数下利用补偿电压的距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 46-53.
SONG Guobing, CHU Xu, KANG Xiaoning, et al. A new approach for distance protection using compensated voltage distribution under distributed parameter model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 46-53.
- [5] SHATERI H, JAMALI S. Comparing measured impedance by distance relay in presence of resistive and inductive fault current limiter[C] // 2009 IEEE Bucharest Power Technology Conference, Bucharest, Romania, 2009: 1-6.
- [6] 刘青, 王增平, 张媛. 消除 STATCOM 对线路距离保护影响方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 93-98.
LIU Qing, WANG Zengping, ZHANG Yuan. Research of a new method of eliminating the effect of STATCOM on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 93-98.
- [7] 刘花蕾, 江道灼, 陈刚, 等. 安装固态限流器后距离保护整定的改进方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 90-95.
LIU Hualei, JIANG Daozhuo, CHEN Gang, et al. Improved setting method of distance protection with the SSFCL[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 90-95.
- [8] 刘宾, 梅军, 郑建勇, 等. SFCL 接入电网对接地短路阻抗继电器接线的影响[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 108-112.
LIU Bin, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Impact of grid-connected SFCL on wiring mode of grounding impedance relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 108-112.
- [9] 傅旭, 王锡凡. 含限流器的电力系统断相短加短路故障计算相补偿发[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 36-38.
FU Xu, WANG Xifan. A phase domain compensation method for calculating open conduction plus short circuit

- fault with fault current limiter[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 36-38.
- [10] 邹亮, 李庆民, 刘洪顺, 等. 计及故障限流器和故障过渡电阻的接地距离保护补偿算法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 56-60.
ZOU Liang, LI Qingmin, LIU Hongshun, et al. Compensation algorithm of grounding distance protection considering FCL and fault resistance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 56-60.
- [11] 彭春萍, 陈允平, 孙建军. 动态电压恢复器及其检测方法的探讨[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 68-71.
PENG Chunping, CHEN Yunping, SUN Jianjun. Study of dynamic voltage restorer and its detecting method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 68-71.
- [12] 瞿硕, 黄纯, 江亚群, 等. DVR 电压暂降检测新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 234-239.
QU Shuo, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A new detection method of voltage sag applied in DVR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 234-239.
- [13] 皇朝霞, 邹旭东, 童力, 等. 基于极点配置和重复控制的电流型单相动态电压调节器[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 252-260.
HUANG Chaoxia, ZOU Xudong, TONG Li, et al. Research on current control mode single-phase dynamic voltage regulator based on pole-assignment and repetitive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 252-260.
- [14] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.

收稿日期: 2014-05-12

作者简介:

涂春鸣(1976-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

邓 树(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子应用技术; E-mail: dengshu_123@126.com

郭 成(1978-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电能质量监测与控制、电力系统分析。

(编辑 张爱琴)