

抗晃电的快速保护方案研究

杨建翔¹, 王英莉²

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 2. 国网陕西省电力公司检修公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 晃电严重影响化工、冶金等工矿企业的生产安全。现有的治理晃电措施主要从用电设备着手, 理想的办法是从晃电本身着手, 快速切除故障或者投入备用电源, 把晃电过程时间降到对用电设备影响最小。从快速切除故障方面来降低晃电的影响, 分析故障前后电流采样值的大小和变化率, 从而制定出以电流采样值的变化率和绝对值共同识别故障的快速保护方案。为了提高故障识别的准确性, 在判断之前消除正常运行时直流分量的影响。经仿真验证, 该快速保护方案能够对系统中任何类型的故障都能够快速、准确地识别出故障, 在故障后 5 ms 使继电保护出口动作。

关键词: 晃电; 电流变化率; 故障识别; 直流分量; 快速保护

Rapid protection scheme during voltage sag

YANG Jianxiang¹, WANG Yingli²

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Maintenance Company of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710065, China)

Abstract: Voltage sag seriously impacts the safety of industrial enterprise such as chemical industry, metallurgy, etc. Existing governance for voltage sag mainly adopts electrical equipment measures, the ideal way is to research voltage sag itself. The impact of voltage sag on electrical equipment can be decreased to minimum by rapidly removing faults or putting into standby power. Reducing the influence of voltage sag by using rapid removal of fault, this paper develops a rapid protection program for identifying the fault by jointly using change rate and absolute value of current sampling value before and after fault. In order to improve the accuracy of fault identification, the DC component of the normal operation should be eliminated before determination. Simulation shows the fast protection scheme is able to quickly and accurately determine any type of fault in power system and makes relay operate after fault occurred 5 ms.

Key words: voltage sag; change rate of current; fault identification; DC component; rapid protection

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0087-06

0 引言

晃电是指电网因雷击、短路、发电厂故障及其它外部、内部原因造成电网短时间电压大幅度波动、甚至短时断电数秒的现象^[1]。这种现象会在许多方面有严重的影响^[2]。煤化工、石化、冶金、制药和化工等企业, 因其生产工艺的控制精度要求较高, 对晃电尤其敏感, 因此保证供电的连续性是非常重要的^[3]; 另一方面晃电发生的电压等级不同其影响范围也会不同。

晃电产生如此重要的影响主要由于以下几个方面的原因: (1) 晃电故障的持续时间较长, 一般可以达到 70~110 ms; (2) 敏感设备对电压凹陷的承受能力为 20 ms; (3) 故障切除太慢是晃电事故的主要原

因之一, 当故障不及时切除时控制类设备的无压释放和对电动机的大电流冲击会造成企业停产损失; (4) 继电保护出口和断路器分闸时间过长是故障切除时间过长的主要因素。

为了减少晃电对企业的影响, 主要从以下方面治理晃电: 快速隔离故障、快速切换电源或者使用不间断供电技术^[4-8]; 使用抗晃电交流接触器、直流接触器、抗晃电模块和在低电压保护增加延时等延缓控制类设备释放^[8]; 当接触器断开电动机失电之后电压恢复正常时将电动机分期分批启动, 当使用微机保护综合控制装置时, 可以通过计算分析甩掉一部分非重要负荷。以上三个办法分别对应系统对晃电的三道防线。

晃电产生的原因一方面是由于系统电压波动引

起；另一方面是由系统内部故障导致的电压降低。对于由故障引起的晃电而言，如果系统在 20 ms 内隔离故障区域并且恢复非故障区域电压 80% 以上才能实现系统的连续供电，因此，理想的办法是使电动机或敏感设备的接触器释放之前将故障切除或者切换至其它电源。目前，故障切除时间包括：继电保护出口的时间为 20~30 ms；断路器的动作时间为 60~150 ms^[11]；燃弧时间 10~20 ms。显然目前的故障切除时间不能满足连续供电 20 ms 内切除故障的要求。一种新型电子式断路器采用过零点开断技术和直动式快速涡流驱动机构可以在 15 ms 之内动作切除故障并息弧，要实现 20 ms 切除故障的快速保护就必须在 5 ms 之内识别故障并动作。因此需要找到一种快速保护方案使其能够快速识别故障，在 5 ms 之内继电保护出口动作。发生故障时，伴随有电流的增大。因此经过对各种故障特征的分析，本文提出一种能较快判别故障的新方法。通过快速识别故障从而实现快速保护，最大程度降低晃电对企业的影响。

1 故障判别

当晃电由短路故障引起时，对应相的电流都会瞬间增大。以单相电路为例，当发生接地短路时，故障前后的故障电流波形如图 1 所示。

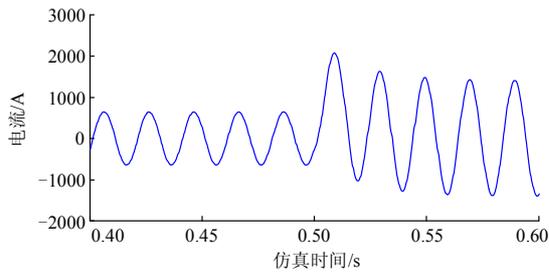


图 1 故障前后电流波形图

Fig. 1 Current waveform before and after fault

由图 1 可以看出故障前后电流的幅值变化较为明显。假设电流波形为正弦波，其表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

对电流求导可以得到电流变化率的表达式：

$$K = I_m \omega \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

故障时电流波形及其变化率的表达式为

$$i_F = I_{Fm} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

$$K_F = I_{Fm} \omega \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (4)$$

图 1 中，故障电流的幅值远大于正常运行时的电流值，即 $I_m < I_{Fm}$ 。同一角度下，必然有 $K_m < K_{Fm}$ 。电流变化率的改变用图形表示如图 2。

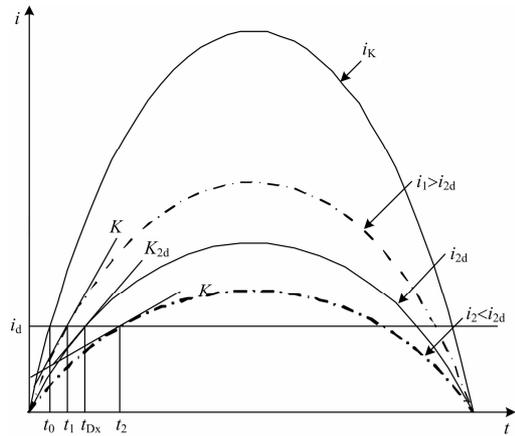


图 2 同一坐标系中电流变化比较

Fig. 2 Comparison of the current changes in the same coordinate system

图中： i_{2d} 、 K_{2d} 分别为电流整定值与电流变化率整定值； i_1 、 i_2 和 i_k 为两种运行方式和故障时的电流波形。

由图 2 可以看出故障发生后，同样大小的电流采样值时刻，故障后的电流采样值变化率与故障前的电流变化率相比明显变大。因此，当故障电流采样值绝对值大于整定值时，可以根据电流的变化率判别系统中是否有故障发生。

即当满足下式时，判断系统中有故障发生：

$$\begin{cases} i > i_d \\ K > K_d \end{cases} \quad (5)$$

另外，正常运行时由于各相负载不平衡、谐波或者其他因素导致电力系统并不是处于完全对称的运行状态，因此负荷电流中含有一定的直流分量。考虑到该直流分量的影响，故障电流采样值绝对值在与定值比较过程中需要排除直流分量的影响。

1.1 电流采样值和电流变化率的定值选取

以三段式电流保护中瞬时电流速断保护为例分析电流采样定值的选取，见图 3。

图 3 中，瞬时电流速断保护的整定值按照躲过最大运行方式下线路出口处发生的三相短路时的短路电流来整定。

$$I'_{d.1} = K'_{rel} I_{K.AB.max} = \frac{K'_{rel} E_\varphi}{Z_{S.min} + Z_{AB}} \quad (6)$$

式中： E_φ 为单端供电系统中电源的相电动势； $Z_{S.min}$ 为系统最大运行方式下的系统阻抗； Z_{AB} 为 AB 线路的线路阻抗； K'_{rel} 为电瞬时电流速断保护的可靠系数，一般取值为 1.1~1.2。

以上为电流定值的计算，在电流整定值附近需

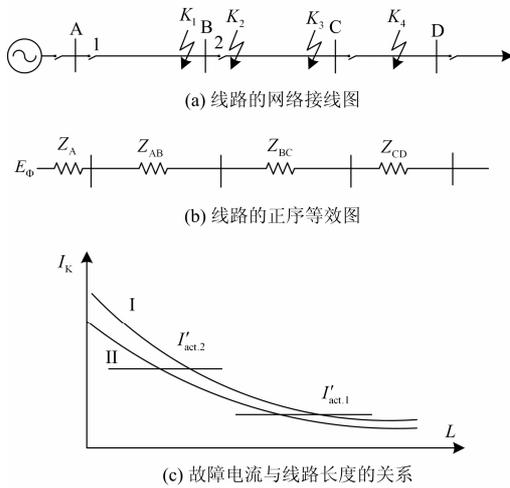


图 3 电流 I 段保护的動作特性分析

Fig. 3 Protection operation characteristic analysis of current I

要计算电流变化率的整定值。考虑到电流有效值和峰值之间的关系：

$$I'_{d,1m} = \sqrt{2}I'_{d,1} \quad (7)$$

由图 4 可以看出, 1/4 周期内的电流变化率在过零点最大(K_1), 接近峰值时电流变化率($K_2 \sim K_6$)逐渐减小, 峰值时电流变化率(K_7)最小。电流下降周期内, 电流变化率的绝对值变化规律与前 1/4 周期的变化规律完全相同; 负半周期内电流变化率的变化规律是由过零点时的绝对值最大逐渐降低, 经过峰值的最小变化率又逐渐增大。将电流信号和电流变化率绝对值处理之后整个周期内电流变化率的变化规律都与前 1/4 周期的变化规律相同。

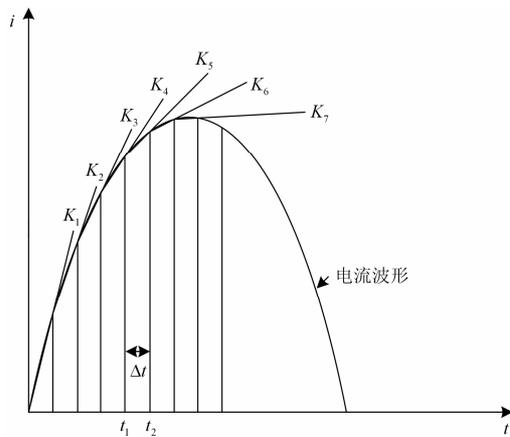


图 4 1/4 周期内电流变化率趋势

Fig. 4 Current rate trends in 1/4 cycle

另外, 由于在零点和峰值处电流变化率并不是单调、连续变化。可以取电流整定值峰值的一半时电流采样值的绝对值作为定值整定值, 依此得到采样值绝对值的定值为

$$I_{act} = I'_{d,1m} / 2 = \sqrt{2}I'_{d,1} / 2 \quad (8)$$

该电流采样值附近的电流变化率单调变化, 对应的电流相位角为 $n\pi \pm 30^\circ$; 取该电流采样值时电流变化率作为电流变化率的整定值, 对应的电流采样值变化率整定值为

$$K_d = \sqrt{2}I'_{d,1} \times 2\pi f \times \cos 30^\circ = 50\pi\sqrt{6}I'_{d,1} \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可知, 采样值绝对值和采样值变化率绝对值的定值都是按通常瞬时电流速断保护整定值的常数倍, 只需按通常电流保护定值整定, 由快速保护软件自动计算出对应的电流采样值绝对值和采样值变化率的绝对值, 所以, 定值的整定配合按通常的电流保护整定原则即可。

1.2 电流变化率计算

要使正半周期和负半周期内的电流变化率具有相同的变化规律, 在对采样点计算之前需要对采集到的电流序列进行取绝对值处理。以保障故障无论发生在正半周期还是负半周期都可以快速地判断, 从而缩短继电保护动作时间。图 5 是对电流信号采样和绝对值处理示意图。

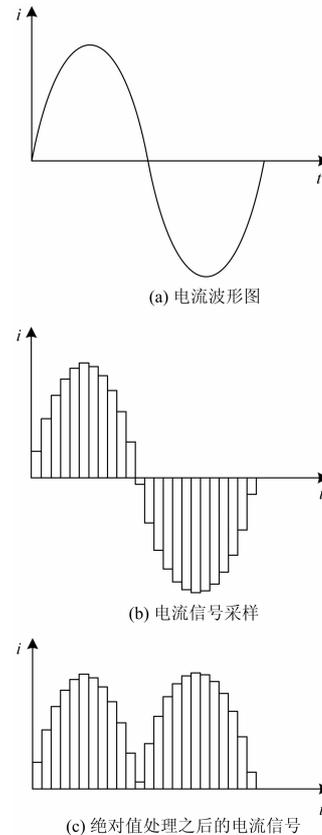


图 5 电流信号处理过程

Fig. 5 Current signal processing

在图 5 中可以看出,对电流 $i_{(t)}$ 进行采样得到电流采样序列 $\{i_{(1)}, i_{(2)}, i_{(3)}, \dots, i_{(N)}\}$ (其中 N 为一个周期内的采样点数),保护以 Δt 为采样时间对电流信号进行采样。经过绝对值处理之后,电流序列的数值均为正值。对处理之后的采样点按式(10)的差分运算可以得到电流的变化率:

$$K_k = \frac{i_{(k)} - i_{(k-1)}}{\Delta t} (1 < k \leq N) \quad (10)$$

干扰时电流变化率的瞬间增大可以满足继电保护的电流变化率判据,因此在使用电流变化率作为保护判据时需要排除干扰对其的影响。干扰对电流变化率的影响主要表现在两个方面:(1)变化率突然变大,不是渐进变化;(2)某几个间断采样点时满足判据,而不是连续采样点持续满足判据;(3)采样率变化率的符号一致性,干扰时有正有负,故障时符号一致。在使用电流变化率作为保护判据时需要有连续、多个采样点电流变化率连续大于正常状态下的变化率且符号保持一致性时判定为系统内部故障发生。

为了防止干扰时保护误动作,需要在电流采样值绝对值大于整定值之后的固定时间段内,对电流变化率进行持续判别。当电流变化率持续大于整定值且变化率按照时间序列渐进变化、符号一致时判定为故障。

$$\begin{cases} |K_k| > K_d \\ K_k > 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} |K_k| > K_d \\ K_k < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(11)和式(12)中 k 为固定区间内的采样次数。当电流变化率满足式(11)或式(12)时判断为故障。具体实现过程中,该固定的时间不能太长且在该区间内的采样次数不能低于 5 次。如果该固定时间为 1 ms,对应一个工频周期内采样点数不少于 100,对应的采样频率不低于 5 000 Hz。

1.3 直流分量对保护定值比较的影响

由于配电网的线路、负荷存在电感、电容等储能元件,所以,在故障或系统波动时,电流含有衰减的非周期直流分量和谐波分量。故障电流的直流分量是按照指数规律单调衰减^[9]。文献[10]中总结目前多种检测直流方法,但方法复杂,并且直流检测效果并不显著;文献[11-12]中采用全波 DFT 算法可以精确估计故障电流中的直流分量;文献[13]采用改进的小波分析法降低直流分量的影响;文献[14]使

用三采样点降低直流分量的影响快速提取基波分量;文献[15]通过增加两个采样点计算得到周期分量外的特征参数,再进行两次傅立叶变换,求取基波和谐波幅值和相位,从而滤除直流分量。但是在中低压系统中,由于故障电流中的直流分量衰减速度快,基本在故障之后的 1~2 ms 之内就衰减完成。另外,为保证继电保护的快速性可以牺牲精确性。综合各方面的原因,因此在该快速保护中仅消除正常运行时直流分量的影响。

为了消除正常运行下不完全对称运行时电流中直流分量对电流保护的影响,需要在故障电流与保护的定值比较之前减去该直流分量。在正常运行情况下,对一个周期内的电流信号进行采集,比较得出电流采样序列中的最大值和最小值。

$$I_{\max} = \max\{i_{(1)}, i_{(2)}, i_{(3)}, \dots, i_{(N)}\} \quad (13)$$

$$I_{\min} = \min\{i_{(1)}, i_{(2)}, i_{(3)}, \dots, i_{(N)}\} \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可以得到一个周期内电流的最大值和最小值。系统完全对称运行时,电流波形关于原点对称,最大值与最小值的绝对值相等。当含有直流分量时,电流波形整体平移之后电流的最大值和最小值不再满足绝对值相等。

假设含有直流分量的电流表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0) + N \quad (15)$$

因此,电流的最大值和最小值分别表示为

$$i_{\max} = I_m + I_p \quad (16)$$

$$i_{\min} = -I_m + I_p \quad (17)$$

将式(16)和式(17)相加可以得到直流分量如式(18)。

$$I_p \approx \frac{i_{\max} + i_{\min}}{2} \quad (18)$$

式中, I_p 代表电流中的直流分量。其中电流的最大值和最小值中都含有直流分量因此之和除 2 可以近似得到直流分量的大小。继电保护的快速性使其在故障过程中使用到的数据并不追求过高的精确度。因此可以将电流序列中的最大值与最小值之和认为正常运行时电流中的直流分量。将故障电流除去该直流分量之后再与电流保护的定值比较,可以进一步提高故障识别的可靠性。

2 快速保护方案

将以上的故障识别方法应用在故障识别中可以较为快速的识别故障从而快速地切除故障。当同时满足故障电流采样值绝对值是大于其的整定值和有连续的电流变化率绝对值大于其定值且渐进变化时

才能判断保护范围内有故障发生。故障识别的逻辑图如图 6 所示。

使用电流变化率作为判别故障的方法不受故障类型变化的影响, 系统中无论发生哪种故障, 只要满足上述判据就可以判断出故障。因此该保护方案在快速识别故障时不受故障类型影响, 具有较高的可靠性。

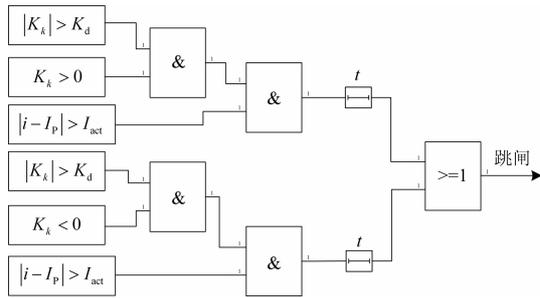


图 6 故障判别逻辑

Fig. 6 Fault identification logic

3 仿真验证

使用 Matlab 建立简单的三相电路对提出的保护方案进行仿真验证。该保护方案原理上可以应用各个电压等级的配电网线路保护。研究以 10 kV 电压等级为代表, 研究快速保护的動作情况。图 7 为仿真模型的示意图。

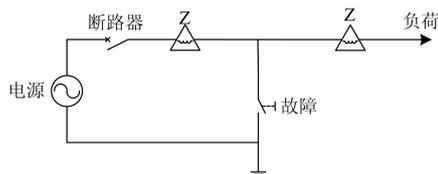


图 7 仿真模型原理图

Fig. 7 Schematic of simulation model

图 7 中 Z 代表线路阻抗。本文的仿真模型中线路长度设置为 2 km; 系统电压为 10 kV。模型中各参数分别如表 1 所示。

以瞬时电流速断保护为例来验证本文快速保护方案的可行性。研究中设置采样时间为 0.2 ms, 即每个工频周期内对电流信号采 100 个点。模型中瞬时电流速断保护的有效值整定为 1054 A, 由保护方案计算得到电流采样值整定值为 745 A、电流变化

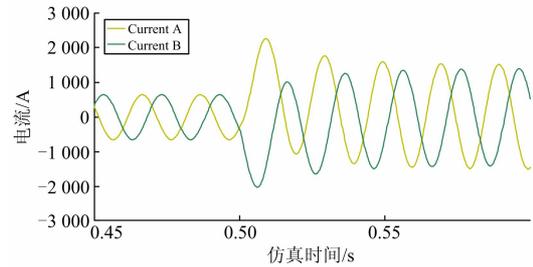
表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

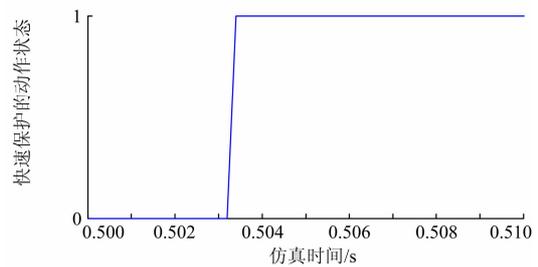
参数	电源	线路	
		正序	零序
电阻/(Ω/km)	0.8929 Ω	0.01273	0.3864
电感/(H/km)	16.58e-3 H	0.9337e-3	4.1264e-3
电容/(F/km)		12.74e-9	7.751e-9

率的整定值为 41110。当有电流采样值绝对值大于定值且该时刻 5 个连续的电流变化率绝对值大于其定值且渐进变化时, 认为有故障发生。

0.5 s 时在线路 0.5 km 处发生 AB 两相短路时, 电流定值比较、电流变化率比较和快速保护的動作状态如图 8 所示。



(a) 故障前后电流波形



(b) 快速保护的動作状态

图 8 AB 两相短路时保护動作情况

Fig. 8 Protection state when A and B short circuit

对系统中分别发生三相短路和两相短路接地故障, 对同一位置处发生各种故障类型时快速保护的動作时间如表 2 所示。

表 2 各种故障情况下快速保护動作时间

Table 2 Rapid protection time on various faults

故障类型	快速保护動作时间/ms
单相接地	不动作
两相短路	3
两相短路接地	3.4
三相短路	3.4

表 2 中可以看出除单相接地外, 其余三种故障情况下电流变化率、电流定值比较和快速保护的動作状态都动作, 快速保护能可靠地动作。由于系统为不接地系统, 单相接地时电流较小保护不动作。

仿真结果证明, 以电流变化率和不含正常状态下直流量影响的电流采样值绝对值共同作保护判据的保护方案对于任何故障类型都能快速切除故障。

4 结论

本文采用电流采样值绝对值和电流采样值变化率绝对值与其定值比较构成快速保护。该保护方案中的定值由传统的电流保护定值经过处理得到, 因

此在线路保护中依然可以采用原有的方法计算有效值的整定值,快速保护据此可以计算出采样值定值和电流采样值变化率定值。仿真证明:该快速保护出口的时间不到 5 ms,小于现有 20~30 ms。该快速保护与快速断路器配合,能在 20 ms 内切除故障,能解决因故障原因引起的晃电问题。

本文对故障暂态过程影响分析较少,有待于下一步根据负荷性质进行深入分析研究。

参考文献

[1] 董勇. 防晃电技术在低压配电系统应用[J]. 冶金动力, 2009(3): 64-65.
DONG Yong. Application of anti-electricity dazzling technology in low voltage distribution system[J]. Metallurgical Power, 2009(3): 64-65.

[2] 陈琳, 严金云. 石化企业晃电影响及抗晃电措施[J]. 电气技术, 2012(10): 72-74.
CHEN Lin, YAN Jinyun. Petrochemical enterprises electric impact and measures for electricity shakes[J]. Electrical Technology, 2012(10): 72-74.

[3] 魏猛. 工厂企业连续供电解决方案和实践探讨[J]. 广东科技, 2014(8): 69-70.
WEI Meng. Continuous power supply solutions and enterprise factory practice[J]. GD Science & Technology, 2014(8): 69-70.

[4] 刘庚欣. 浅析工厂企业连续供电解决方案[J]. 医药工程设计, 2013, 34(3): 61-63.
LIU Gengxin. Analysis of scheme of continuous power supply for factories and enterprises[J]. Pharmaceutical & Engineering Design, 2013, 34(3): 61-63.

[5] 段景义, 高培华. 保证化工企业安全连续供电的经验[J]. 氯碱工业, 2009, 45(6): 7.
DUAN Jingyi, GAO Peihua. Ensuring the safety of the chemical enterprise continuous power supply[J]. Chlor-Alkali Industry, 2009, 45(6): 7.

[6] 张子富. 化工企业连续供电方式的实现[J]. 电气应用, 2006, 25(6): 95-98.
ZHANG Zifu. The realization of the chemical enterprise continuous power supply[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(6): 95-98.

[7] 孙希玉. 基于电源快速切换的工业企业低压母线连续供电研究[J]. 中国新技术新产品, 2012(9): 108.
SUN Xiyu. Low voltage industrial enterprises continuous power supply based on quickly switch[J]. China New Technologies and Products, 2012(9): 108.

[8] 韩晋, 黄健. 工业企业低压母线连续供电方案[J]. 低压电器, 2011(21): 35-39.
HAN Jin, HUANG Jian. Low voltage bus power supply for industrial enterprises[J]. Low Voltage Apparatus, 2011(21): 35-39.

[9] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 (上册)[M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

[10] 周林, 杨冰, 郭珂, 等. 光伏并网系统中直流注入问题最新进展及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 147-155.
ZHOU Lin, YANG Bing, GUO Ke, et al. The progress and development trend of the DC injection issue in PV grid-connected systems[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 147-155.

[11] 张小鸣, 费雨胜. 一种滤除衰减直流分量的电流估计新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 90-95.
ZHANG Xiaoming, FEI Yusheng. A new current estimation algorithm to filter decaying DC component[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 90-95.

[12] 张秋丽, 黄纯, 贺建辉, 等. 一种消除衰减直流分量影响的改进 DFT 递推算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 1-5.
ZHANG Qiuli, HUANG Chun, HE Jianhui, et al. An improved recursive discrete Fourier transform algorithm for eliminating decaying DC component[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 1-5.

[13] 雷乃清, 许钰婷. 基于小波分析的电动机综合保护器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 250-252.
LEI Naiqing, XU Yuting. Design of motor comprehensive protector based on wavelet analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 250-252.

[14] 黄世年, 佟为明, 郭志忠, 等. 直接提取基频分量瞬时速度的快速滤波算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 44-49.
HUANG Shinian, DONG Weiming, GUO Zhizhong, et al. A fast filtering algorithm for fundamental instantaneous value[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 44-49.

[15] 厉伟, 陈刚. 一种利用 LabVIEW 滤除衰减直流分量的改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 7-12.
LI Wei, CHEN Gang. An improved algorithm to filter decaying DC component based on Labview[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 7-12.

收稿日期: 2015-01-22

作者简介:

杨建翔(1968-), 男, 讲师, 主要从事自动化与信息化方面的研究; E-mail: yangjianxiang@xust.edu.cn

王英莉(1991-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: wangying4li@qq.com

(编辑 张爱琴)