

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191412

用于限流控制的瞬时值与变化率结合的故障电流快速识别改进算法

刘健^{1,2}, 王浦任², 张志华^{1,2}

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 西安理工大学自动化学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了使故障判别的速度满足限流控制的应用要求, 针对瞬时值与变化率结合的故障电流快速识别基本算法, 提出一种对瞬时值与变化率整定值分别加乘系数的改进算法。利用数值仿真的方法分析了故障相角、大负荷投入、谐波等因素的影响, 给出改进方法调整系数的选取方法。对改进算法在某企业限流控制的应用进行了实例分析, 给出其调整系数的取值范围以及其性能改善的效果, 证明了其可行性和有效性。结果表明, 改进算法能够确保在期望的时间内识别出期望识别的故障电流, 各种故障相角、大负荷投入、谐波等都不会造成误判别。

关键词: 配电网; 故障; 快速故障识别; 整定; 快速开关

Improved fast fault detection algorithm on instantaneous current and its variation for current limitation control

LIU Jian^{1,2}, WANG Puren², ZHANG Zhihua^{1,2}

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China;

2. School of Automation, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To enable fault detection speed to meet the requirement of short-circuit current limitation control, an improved approach introducing multiple parameters is proposed for the basic methodology of a fast fault detection algorithm based on instantaneous current and its variation ratio. By means of numerical simulation, the influence of fault phase angle, large load input, harmonic current and inrush current is analyzed, and the selection of an adjustment coefficient of the proposed algorithm is also obtained. An example is analyzed in the application of current limiting control in an enterprise, and the range of adjustment coefficients of the improved method and the magnitude of its performance improvement are given. The result proves its feasibility and effectiveness. It is concluded that the fault current can be identified within the desired time without mistakes due to fault phase angle, large load input and harmonic current.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China "Key Technologies for Urban Intelligent Distribution Network Protection and Self-cure Control" (No. U1766208).

Key words: distributed networks; fault; fast fault detection; setting; fast switch

0 引言

由于我国变电站采取“大容量、少布点”的规划建设理念, 配电网存在短路电流大的问题, 短路电流超过 20 kA 并不罕见^[1-3]。

短路电流大不仅对电气设备要求高也增大了故障的破坏能力, 国家电网公司企业标准《配电网技术导则》(Q/GDW 10370-2016)规定 10 kV 出线短路

电流水平一般应不超过 20 kA, 对于过大的短路电流需要采取限制措施^[4-6]。此外, 随着短路电流被有效限制, 困扰电压敏感负荷的因故障导致的电压暂降问题也能得以解决^[7-8]。

常见的限流措施有采用限流电抗器^[7-8]和高阻抗变压器^[11-12], 但上述措施不但会加大损耗, 并且还会增加电压降^[13]。文献^[14-15]论述了近年来逐渐成熟的采用涡流增速斥力机构, 基于斥力机构构成的快速开关和限流阻抗并联的限流装置已经应用于系统中^[16-18], 它可以在发生相间短路故障时, 迅速断开快速开关投入与其并联的限流阻抗, 从而有效抑制

基金项目: 国家自然科学基金资助“城市智能配电网保护与自愈控制关键技术”(U1766208)

限制短路电流,而在下游无故障发生时合上快速开关旁路限流阻抗,从而不引起附加损耗和电压降^[19]。

在上述限流控制的应用中,要求快速开关具有很快的动作速度,为此不仅需要开关的操动机构快,而且还需要故障识别算法快^[20]。要求故障识别算法要确保能够不漏判,而极少数的误判不影响使用。因为,该电抗器的参数设计既满足限流的要求又满足最大负荷下电压降落在允许的限值(如:0.85 p.u.),因此即使误判导致开关快速断开投入限流电抗器,也容易采取常规算法判断出其实并未发生故障,则控制该开关再次快速合闸旁路限流电抗器即可。

目前,涡流增速斥力机构的快速开关本体的动作速度已经能够做到 1 ms 左右,所采用的故障识别算法也需做到毫秒级^[21-23]。而传统的故障检测算法一般采用傅氏算法^[24],即使采用半波傅氏算法也至少需要采集 10 ms 数据后才可进行判断^[25],不能满足快速识别的要求。

文献[26]指出,基于电流定积分进行故障检测的方法抗干扰性强,但识别速度无法满足故障快速识别的要求;单独基于电流瞬时值或电流变化率进行故障检测的方法速度快,但是在正常电流瞬时值很小时可能会由于采样误差导致电流变化率判据满足而误判为短路、在正常电流较大时可能会由于受到随机干扰导致电流瞬时值判据满足而误判为短路。采用电流瞬时值与电流变化率相结合构成判据进行故障识别的方法^[27],由于需要同时满足两个判据才会判断为短路,其抗干扰能力比单一判据有所提高,在实际当中应用较多,但是应用中发现其并非总能实现快速识别,有时甚至在半个周波以后才能识别出短路电流,严重影响限流控制效果。

本文即在对已有电流瞬时值与电流变化率相结合的故障快速识别判据进行深入分析的基础上,找出造成其识别速度劣化的原因,并提出解决方案。

1 故障快速识别的基本判据

设期望将故障电流的有效值超过 I_{zd} 的情形快速检测出来,期望的检测时间上限为 t_d ,在 $i-t$ 平面中绘出典型电流瞬时值曲线,如图 1 所示。图中, $i_{zd}(t)$ 为以 I_{zd} 为有效值的电流曲线, $i_1(t)$ 和 $i_2(t)$ 分别为故障和非故障两种典型情形下的电流,且 $i_1(t) > i_{zd}(t)$, $i_2(t) < i_{zd}(t)$, $D_1 = di_1(t)/dt$, $D_2 = di_2(t)/dt$, $D_{zd} = di_{zd}(t_d)/dt$, S 点坐标为 $[t_d, i_{zd}(t_d)]$ 。

$$\text{设 } I_S = i_{zd}(t_d) \quad (1)$$

基于电流瞬时值及其变化率,可以构造如式(2)和式(3)所示的故障快速识别基本判据,当检测到电

流 $i(t)$ 同时满足式(2)和式(3)时,即可判别为故障。

$$|i(t)| \geq |I_S| \quad (2)$$

$$\left| \frac{di(t)}{dt} \right| \geq |D_{zd}| \quad (3)$$

式(2)和式(3)中,“ $|A|$ ”代表 A 的绝对值。

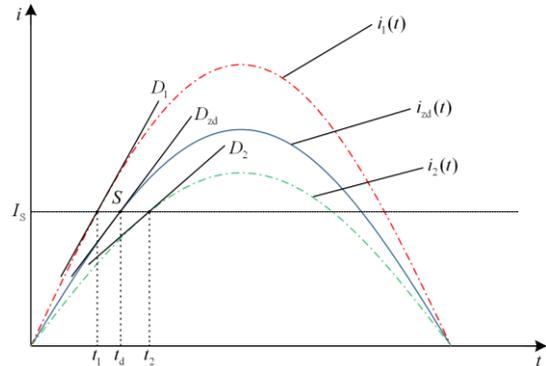


图 1 快速开关的短路故障快速识别判据示意图

Fig. 1 Illustration of the fast fault identification criterion of the fast circuit breakers

实际应用中,只需要整定电流瞬时值整定值 I_S 和电流变化率整定值 D_{zd} 即可。

对于图 1 中的曲线 $i_1(t)$ 在各个时刻均大于以 I_{zd} 为有效值的电流 $i_{zd}(t)$, 理应为故障。根据故障快速识别判据,在 t_1 时刻,同时满足式(2)和式(3),因此可以正确判别为故障。对于图 1 中的曲线 $i_2(t)$ 在各个时刻均小于以 I_{zd} 为有效值的电流 $i_{zd}(t)$, 理应处于非故障状态。根据故障快速识别判据,在 t_2 时刻,虽然满足式(2),但是不满足式(3),因此可正确判断为非故障状态。可见,式(2)和式(3)描述的故障快速识别判据与常规有效值判据是等价的。

在不考虑系统阻抗的情况下,根据故障快速识别判据, I_S 、 I_{zd} 和 t_d 的关系曲线如图 2 所示。

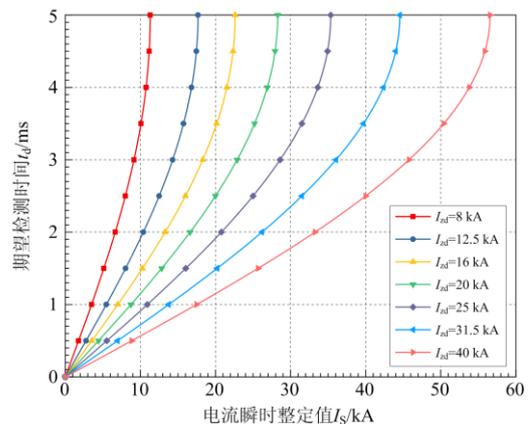


图 2 I_S 、 I_{zd} 和 t_d 的关系曲线

Fig. 2 Relationship of I_S , I_{zd} and t_d

2 故障快速识别的改进判据

上节所述基本判据的最大不足在于：将短路电流看作是理想正弦波，而实际上还应包含有衰减直流分量等。式(1)—式(3)所描述的故障快速识别基本判据比较理想化，在实际应用中会受到故障相角的影响而性能变差。

由于故障点上游的系统阻抗和馈线阻抗都呈感性，因此故障前后电流不能突变，也即在故障后检测到的电流不能从 $i_2(t)$ 立即突变为 $i_1(t)$ ，有可能造成由于式(2)或式(3)不满足而在故障所在发生的 $1/4$ 周期内无法满足故障判断条件，而需要在下个 $1/4$ 周期甚至下个 $1/4$ 周期之后才能检测出来，严重影响故障检测时间，如图3所示。

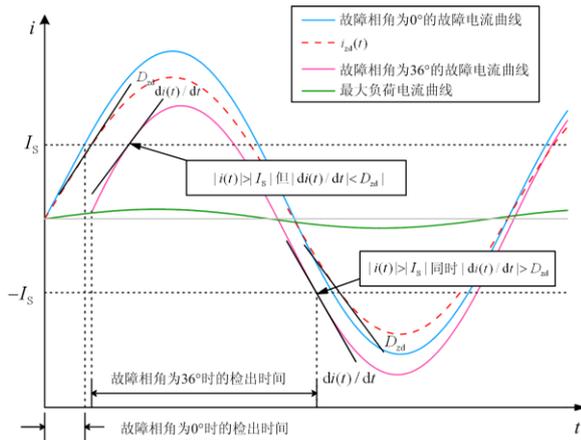


图3 故障相角因素引起的故障检出时间劣化
Fig. 3 Fault detection time lengthened due to the fault phase angle

为了解决上述问题，提出式(4)和式(5)描述的故障快速识别的改进判据。

$$|i(t)| \geq \alpha \cdot |I_s| \quad (4)$$

$$\left| \frac{di(t)}{dt} \right| \geq \beta \cdot |D_{zd}| \quad (5)$$

式中： α 是电流瞬时整定调整系数； β 是电流变化率整定调整系数。

改进判据的主要思想是，通过调节 α 和 β ，为故障检测判据提供一定的灵活性，以提高其适应性。

既然是故障快速识别，就希望故障的持续时间不超过期望的检测时间上限 t_d ，为此，电流瞬时整定值 $\alpha|I_s|$ 应小于故障电流在 t_d 时刻的值 $i_1(t_d)$ ，从而使得故障在期望检测时间内一定能被检测出来，即 $\alpha|I_s| < i_1(t_d)$ ，则电流瞬时整定调整系数 α 存在上限：

$$\alpha < \frac{i_1(t_d)}{|I_s|} \quad (6)$$

一般情况下， I_{zd} 往往比故障电流 $i_1(t)$ 都要选取的小，所以式(6)是自然成立的，本文提出的改进判据主要是通过两个整定值经过不同程度的减小来获得快速识别算法检测时间性能的改良，因此一般情况下取 $\alpha < 1$ 。

由于 I_{zd} 与正常运行时的负载电流 I_L 留有较大的差距，在系统正常运行时，为了使故障快速识别判据不误动，电流瞬时整定值 $\alpha|I_s|$ 可取大于最大负荷电流 $i_L(t)$ 的峰值 I_{Lmax} 从而与最大负荷电流曲线不交叉，即 $\alpha|I_s| > I_{Lmax}$ 。电流变化率整定值应大于最大负荷电流的最大变化率 D_{Lmax} ，即 $\beta|D_{zd}| > D_{Lmax}$ ，同理 $\beta < 1$ 。

$\alpha|I_s|$ 和 $\beta|D_{zd}|$ 的取值范围示意图如图4所示。

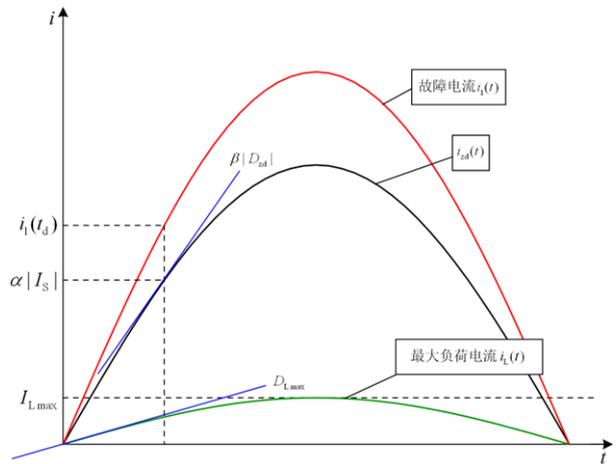


图4 改进判据整定值的取值范围

Fig. 4 Ranges of the setting values in the improved criterion

综上所述，可得电流瞬时整定调整系数 α 和电流变化率整定调整系数 β 的取值边界为

$$\frac{I_{Lmax}}{|I_s|} < \alpha < 1 \quad (7)$$

$$\frac{D_{Lmax}}{|D_{zd}|} < \beta < 1 \quad (8)$$

由于负荷电流的峰值和电流变化率最大值一般不会同时出现，因此上述调整系数下限使得调整后的故障快速识别判据具有良好的抗误动的性能。

关于调整系数 α 和 β 的选取问题，将在第3节专门论述其可以确保性能的取值范围，理论上讲 α 和 β 只要在该范围内取值，都是可行的，但是为了确保其性能，实际选取时应尽量远离取值范围边界。

3 适应性分析

本节基于 PSCAD 数字仿真对改进判据的适应性进行分析和归纳,得到的短路电流波形并非理想正弦波而是包含有衰减直分量等。

3.1 故障相角的影响

对于相间短路,只要检测到其任一相满足判据就可认定为故障,由于三相相间短路比两相相间短路可检出故障的相数多一个,因此检出时间更快。所以只要两相相间短路的检出时间满足要求,则三相相间短路的检出时间一定满足要求。

因此,讨论线路某点发生 AB 两相短路故障的场景即可(仿真模型及参数见附录 A 图 A1 和表 A1)。如果在变电站出线处测得有效值为 I_{zd} 的故障电流,变电站母线电压为 U ,故障电流检测点在变电站出线断路器处。考虑到线路电抗和系统等效阻抗的影响,并严格起见认为其为纯电抗 X (根据第 2 节分析,正是由于电抗部分限制了短路电流的增速,有可能导致基本判据动作较慢),则两相金属性短路故障电流有效值为 I_{zd} 时, $X=U/(2I_{zd})$ 。

由第 2 节分析可知,采用基本判据时(即 $\alpha = \beta = 1$),会出现由故障相角引起的检测时间劣化的问题,且劣化的检测时间远远大于期望检测时间。表 1 给出的是期望检测时间 $t_d = 2 \text{ ms}$ 时,故障相角 φ 以 A 相为参考,基本判据在各种 I_{zd} 的取值下,故障电流的上下限都取最小值 I_{zd} 的最不利情况下(即 $i_1(t)$ 的有效值 $= I_{zd}$,由图 1 可知,有效值大于 I_{zd} 的故障电流的检出时间将会比 t_d 更短),两相相间短路的最大检出时间 t_{max} (A 相和 B 相任一相检出即认为检出了故障)及对应的故障相角。

表 1 最大检出时间及其对应的故障相角

Table 1 Maximum detection time and corresponding fault phase angle

I_{zd}/kA	最大检出时间及其对应的故障相角		I_{zd}/kA	最大检出时间及其对应的故障相角	
	t_{max}/ms	$\varphi/(\circ)$		t_{max}/ms	$\varphi/(\circ)$
	8	11.75		36	25
12.5	11.86	35	31.5	12.02	33
16	11.91	35	40	11.97	33
20	12.02	33			

可见,采用基本判据,不同 I_{zd} 的最大检出时间都在 11~13 ms,远远长于所期望的 2 ms。为了解决这个问题,就需利用整定调整系数 α 和 β 对基本判据中的整定值加以调整。

基于数值仿真并采用穷举法对 α 和 β 的组合性

遍历,可以得到满足短路故障检出时间不大于 t_d 要求的 α 和 β 的取值范围,如图 5 中阴影所示。

由于调整后的整定值会变小,实际检出电流的瞬时值为 $\alpha |I_s|$,对应的有效值略小于 I_{zd} ,在实际应用时选择远离图 5 阴影范围中的 P 点对应的 α 和 β 值,就能保证其远大于最大负荷电流,从而保证其动作可靠性。

综上所述,通过调整 α 和 β ,改进后的故障快速识别判据,可以把在任何故障相角发生的相间短路故障都在期望检测时间内检测出来。

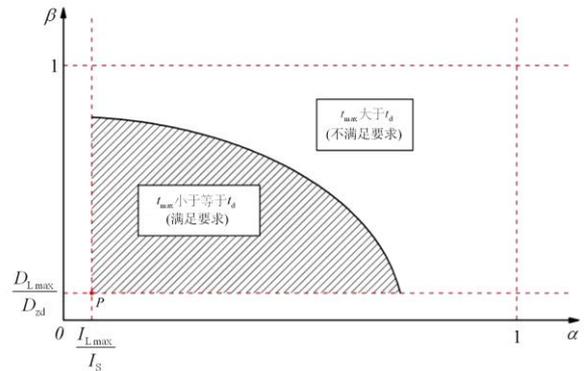


图 5 满足要求的 α 和 β 的取值范围

Fig. 5 Area of α and β reaching the required fault detection time

值得注意的是,采用传统判据的情形对应于图 5 上 $\alpha=1, \beta=1$ 的点,该点不在能确保性能的阴影区域之内,验证了本文论述的改进方法的优越性。

3.2 大负荷投入的影响

受载流量的限制,所投入的负荷最大也不会超过馈线的额定载流量,在额定载流量负荷投入的瞬间, $di(t)/dt$ 的最大值为 D_{Lmax} ,而在满足式(8)进行整定后, $\beta |D_{zd}| > D_{Lmax}$,也即瞬时电流变化率判据始终不会满足;在满足式(7)进行整定后, $\alpha |I_s| > I_{Lmax}$,也即瞬时电流判据也始终不会满足;并且由于电流 $i(t)$ 不会突变, D_{Lmax} 和 I_{Lmax} 不会同时到来。

综上所述,改进判据不会将大负荷投入误判为故障。

一般情况下,10 kV 配网线路的最大载流量不超过 600 A,其最大负荷为 11 MVA。在我国,10 kV 配电网的短路电流水平要求限制在 20 kA 以内,超过这个水平可以采用基于快速开关并联的无损限流器,在限流前短路电流 40 kA 的极端情况下,对各种功率因数的全部 11 MVA 负荷的数字仿真结果(仿真模型见附录 A 图 A2,仿真结果见附录 A 图 A3)

表明, 采用改进判据都没有造成因大负荷投入而误判为故障的现象, 再次验证了上述结论。

3.3 谐波的影响

配电网中的谐波来源于具有铁芯结构的电力设备、电力电子设备、整流装置和电弧炉等, 大量的谐波源会使配电网的某些检测装置误动, 从而造成一系列不良影响。由于配电网 10 kV 侧为三角形接法, 抑制了 3 的倍数次谐波, 一般情况下, 配电网 10 kV 侧中存在大量 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波。

假设考虑谐波注入影响的馈线瞬时电流最大值为 I_{Lh} , 当快速识别的改进判据中电流瞬时整定值大于 I_{Lh} 时, 即 $\alpha|I_S| > I_{Lh}$, 则可躲过谐波注入的影响(如有谐波存在, 电流变化率较大, 式(5)容易满足, 所以只能利用式(4)的条件克服谐波的影响), 可将考虑谐波影响的电流瞬时整定调整系数下限设为 $\alpha_h = I_{Lh}/|I_S|$, 则满足 $t_{max} \leq t_d$ 且能躲过谐波影响的调整系数的取值范围如图 6 中阴影部分所示。

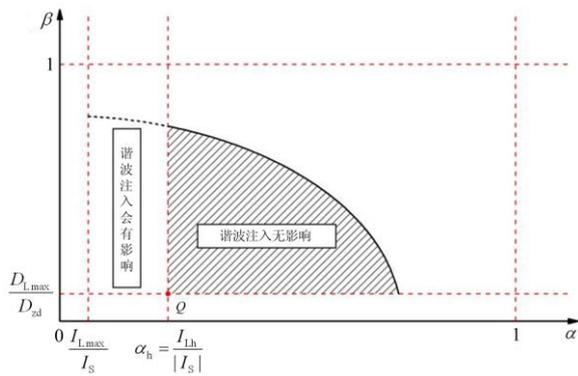


图 6 考虑谐波影响的调整系数取值

Fig. 6 Area of the adjustment factor with harmonic consideration

为保证其动作的可靠性, 在实际应用时应选择远离图 6 阴影范围中的 Q 点对应的 α 和 β 值。

极端情况下, 阴影区域可能太小甚至不存在, 大都是由于 I_{zd} 太小造成的, 考虑到快速识别的目的主要针对很大电流的情形, 上述情况一般不会发生。

值得注意的是, 采用传统判据的情形对应于图 6 上 $\alpha=1, \beta=1$ 的点, 该点不在能确保性能的阴影区域之内, 验证了本文论述的改进方法的优越性。

4 实例分析

某大型化工企业 10 kV 系统故障率较高, 存在短路电流超标问题, 且会引起母线电压暂降, 给安全运行带来了巨大的隐患。为解决此问题, 在其变电站 10 kV 出线处装设基于快速开关与限流阻抗并联的母线电压快速恢复装置。

该企业变电站某一回 10 kV 出线负荷电流为 279 A, 出线断路器的额定短路开断电流为 31.5 kA。保守起见, 快速识别器使用的故障电流快速识别算法中, 采用 $I_{zd}=25$ kA 和 $t_d=2$ ms 的参数设置, 则 $I_S=20.7813$ kA, $D_{zd}=8.9859$ kA/ms。由本文所提出的改进判据的整定方法可得, $\alpha_{min}=I_{Lmax}/|I_S|=0.041$, $\beta_{min}=D_{Lmax}/|D_{zd}|=0.030$ 。根据该企业计量记录, 10 kV 系统内 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波电流实测有效值为 9.8 A、7.3 A、4.3 A 和 4.1 A, 则 $\alpha_h=I_{Lh}/|I_S|=0.043$ 。采用第 3 节中论述的方法, 可以得到改进判据的调整系数的取值范围, 如图 7 阴影部分所示。

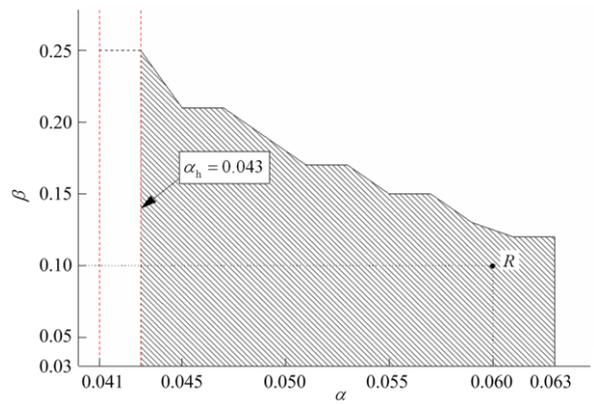


图 7 改进判据的调整系数取值范围

Fig. 7 Area of the adjustment factor in the improved criterion

在此取值范围内, 可选取 R 点坐标 $(\alpha, \beta)=(0.06, 0.1)$ 作为改进判据的整定调整系数。正常运行时电流波形如图 8 所示。

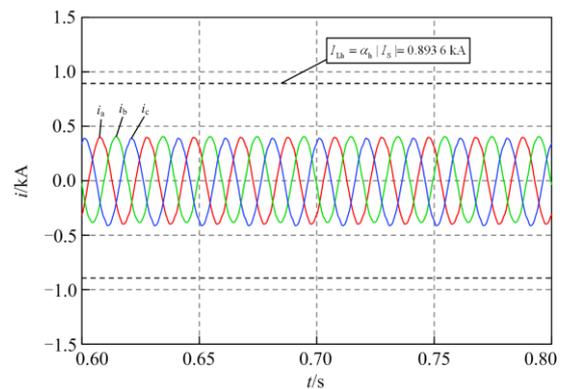


图 8 正常运行时的电流波形

Fig. 8 Waveform of current during normal operation

由图 8 可见, 正常运行的电流不会超过考虑谐波后的瞬时电流的最大值 I_{Lh} , 改进判据不会误动作。

图 9 分别给出了采用基本判据和改进判据时, 在各故障相角下故障电流的检出时间。

由图 9 可见：基本判据的最大检出时间为 11.9 ms，且大部分故障相角下发生的短路故障都会在大于 t_d 的时间被检出，不能很好地满足快速性的要求。采用改进判据后，各故障相角下最大检出时间为 2 ms，且大多数情况下，短路故障都可以在 1 ms 以内被检出，相比基本判据具有显著的优越性。

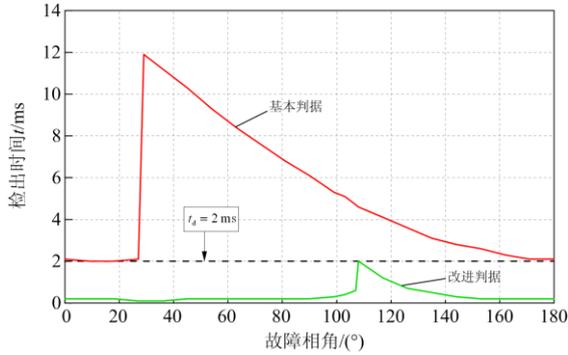


图 9 各故障相角下的检出时间

Fig. 9 Detection time under each fault phase angle

5 结论

1) 瞬时值与变化率结合的故障电流快速识别基本算法存在不能确保故障识别时间在设计范围内的不足，其原因在于由于电力传输环节的感性导致电流瞬时值不能由正常曲线瞬时突变到故障曲线。

2) 基于加乘系数的瞬时值与变化率结合的故障电流快速识别改进算法能够确保在期望的时间内识别出期望识别的故障电流，各种故障相角、大负荷投入、谐波等都不会造成误判别。

附录 A

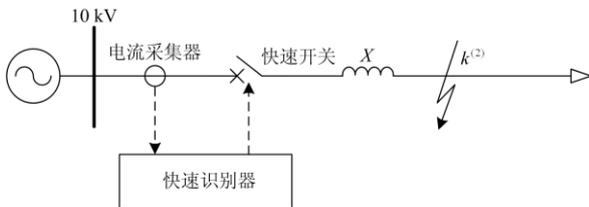


图 A1 短路故障仿真模型

Fig A1 Simulation model of short circuit fault

表 A1 短路故障仿真模型参数

Table A1 Simulation model parameters of short circuit fault

参数项	设定值
电源的线电压 U	10 kV
母线处的短路电流	40 kA
电源内阻抗	$Z_s = 10.5/40\sqrt{3} = 0.151 \Omega$
X	$X = U/(2I_{zd})$

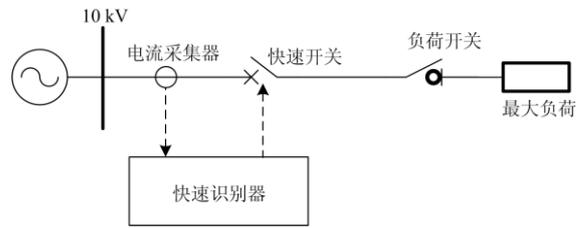
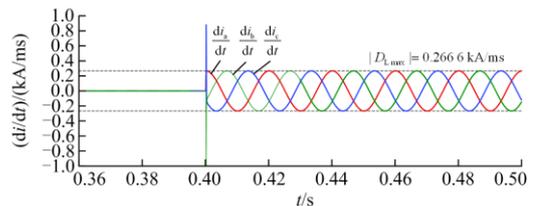
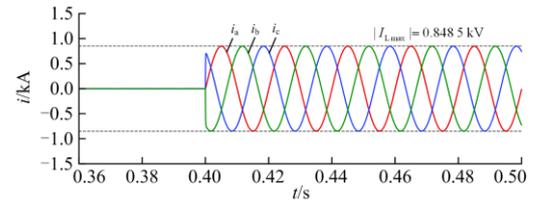
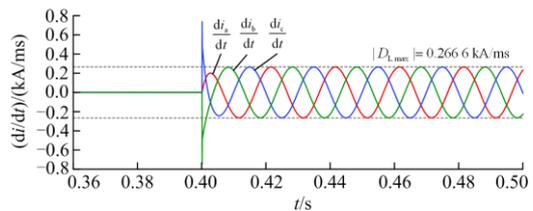
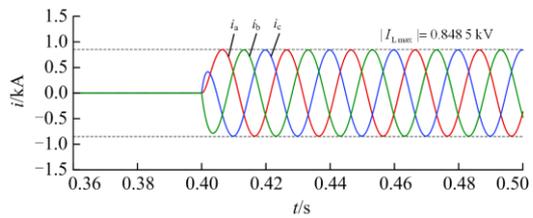


图 A2 大负荷投入仿真模型

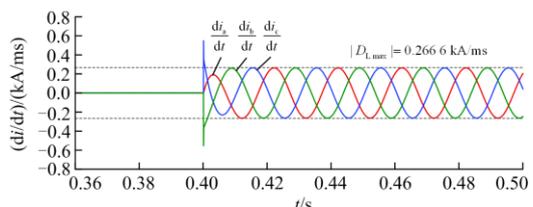
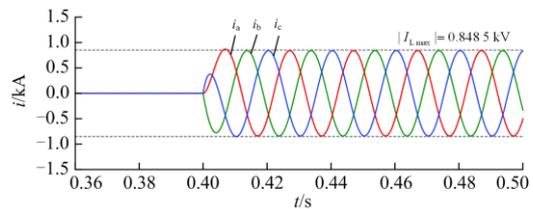
Fig A2 Simulation model of the maximum load inputting



(a) $\cos \varphi=0.95$



(b) $\cos \varphi=0.9$



(c) $\cos \varphi=0.8$

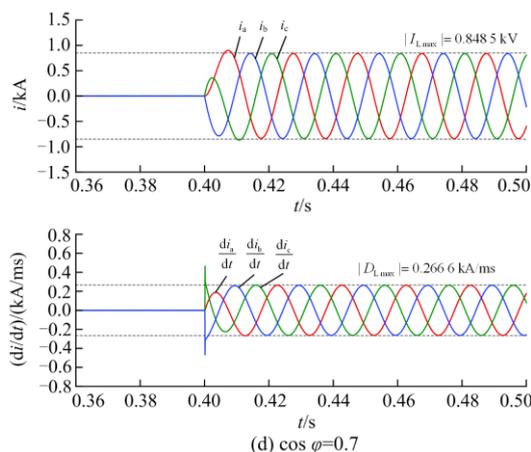


图 A3 投入最大负荷时的电流及其变化率波形

Fig A3 Waveform of current and its variation ratio when inputting the maximum load

参考文献

- [1] 中华人民共和国企业联合会. 35 kV~110 kV 变电站设计规范: GB 50059—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
China Enterprise Confederation. Code for design of 35 kV~110 kV substation: GB 50059—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [2] 黄红玲. 关于 10 kV 电压等级设备短路电流水平问题的研究[J]. 企业科技与发展, 2012(23): 39-41.
HUANG Hongling. Research on the short-circuit current level of the 10 kV voltage equipment[J]. Enterprise Science and Technology & Development, 2012(23): 39-41.
- [3] 赵帅, 张来, 雷光宇, 等. 变电站主变短路电压参数优化设计方法[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 60-66.
ZHAO Shuai, ZHANG Lai, LEI Guangyu, et al. Optimization design method of short circuit voltage of main transformer in substation[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 60-66.
- [4] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.
YUAN Juan, LIU Wenyong, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China Power Grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45.
- [5] 国家电网有限公司. 配电网技术导则: Q/GDW 10370—2016[S].
State Grid Corporation of China. Technical guidelines for distribution network: Q/GDW 10370—2016[S].
- [6] 朱逸凡, 赵宏程, 陈争光, 等. 适用于逆变型电源接入的配电网故障方向判别元件[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 76-82.
ZHU Yifan, ZHAO Hongcheng, CHEN Zhengguang, et al. Fault direction discriminating element used for the distribution network with IIG integration[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 76-82.
- [7] MA Li, ZHOU Qian. Research on relieving voltage sag of sensitive load node based on fault current limiter[C] // 2016 IEEE International Symposium on Computer, Consumer, and Control, July 4-6, 2016, Xi'an, China: 858-861.
- [8] JAFARI M, NADERI S B, HAGH M T, et al. Voltage sag compensation of point of common coupling (PCC) using fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2638-2646.
- [9] 祝瑞金, 蒋跃强, 杨增辉, 等. 串联电抗器限流技术的应用研究[J]. 华东电力, 2005, 33(5): 18-22.
ZHU Ruijin, JIANG Yueqiang, YANG Zenghui, et al. Application study of series reactor current limiting technology[J]. East China Electric Power, 2005, 33(5): 18-22.
- [10] 周明, 曹炜, 陈文涛, 等. 串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 147-153.
ZHOU Ming, CAO Wei, CHEN Wentao, et al. Study on influence of series reactor on power system short-circuit current characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 147-153.
- [11] 陈丽莉, 黄民翔, 张弘, 等. 电网限流措施的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 38-42.
CHEN Lili, HUANG Minxiang, ZHANG Hong, et al. An optimization strategy for limiting short circuit current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 38-42.
- [12] 尹项根, 曹文斌, 潘远林, 等. 高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 1-11.
YIN Xianggen, CAO Wenbin, PAN Yuanlin, et al. Inrush current characteristic of high-impedance transformers and its impact on protective relays[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 1-11.
- [13] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 148-151, 158.
HAN Ge, HAN Liu, WU Lin. Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 148-151, 158.
- [14] AHN K Y, KIM S H. Modeling and analysis of high speed circuit breaker mechanism with a spring actuated cam[J].

- Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 2001, 215: 663-672.
- [15] 李庆民, 刘卫东, 钱家骊. 电磁推力机构的一种分析方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 20-24.
LI Qingmin, LIU Weidong, QIAN Jiali. An analytical method for electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 20-24.
- [16] 黄永宁, 艾少贵, 李艳军, 等. 快速真空断路器在限流技术中的应用[J]. 宁夏电力, 2014(6): 18-23.
HUANG Yongning, AI Shaogui, LI Yanjun, et al. Application of fast vacuum breaker on current limiting technology[J]. Ningxia Electric Power, 2014(6): 18-23.
- [17] 吴桂林, 颜云飞. 基于快速开关的防止大范围停运的解决方案[J]. 供用电, 2017, 34(11): 16-19.
WU Guilin, YAN Yunfei. A solution to prevent large scale outages based on fast circuit breakers[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(11): 16-19.
- [18] 安昌萍, 文春雷, 唐世宇, 等. 10 kV 开关型无损耗故障限流装置的研制及试运行[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2013, 18(6): 34-37.
AN Changping, WEN Chunlei, TANG Shiyu, et al. A study on the development of the 10 kV switch-type loss-free fault current limiter and its trial operation[J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2013, 18(6): 34-37.
- [19] 刘健. 快速开关技术应用现状与展望[J]. 供用电, 2017, 34(11): 7-11.
LIU Jian. Application status and prospect of fast circuit breakers[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(11): 7-11.
- [20] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [21] 张波, 余振, 陈文龙, 等. 基于快速开关的短路电流超标治理的研究[J]. 供用电, 2017, 34(11): 20-23, 6.
ZHANG Bo, YU Zhen, CHEN Wenlong, et al. Research on the governance of short circuit current exceeding based on fast circuit breakers[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(11): 20-23, 6.
- [22] 李庆民, 刘卫东, 徐国政, 等. 高压快速转换开关的研制[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 6-7.
LI Qingmin, LIU Weidong, XU Guozheng, et al. Research on high voltage fast transfer switch[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6): 6-7.
- [23] 娄杰, 李庆民, 孙庆森, 等. 快速电磁推力机构的动态特性仿真与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 23-29.
LOU Jie, LI Qingmin, SUN Qingsen, et al. Dynamic characteristics simulation and optimal design of the fast electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 23-29.
- [24] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 电力系统微机保护故障信息检测算法综述[J]. 电测与仪表, 2011, 48(2): 1-5.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. State of arts of fault detection arithmetic of power systems microcomputer protection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(2): 1-5.
- [25] 丁书文, 张承学. 半波傅氏算法的改进——一种新的微机保护交流采样快速算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 18-20.
DING Shuwen, ZHANG Chengxue. An improved half-wave Fourier algorithm—a new fast algorithm for microprocessor based protection AC sampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 18-20.
- [26] 李炳绪, 李兴斌, 陈思磊. 短路故障快速检测方法综述[J]. 电器与能效管理技术, 2018(2): 1-10.
LI Bingxu, LI Xingbin, CHEN Silei. Review on fast short-circuit fault detection methods[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(2): 1-10.
- [27] 刘健, 侯义明, 黄邵远, 等. 简单配电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

收稿日期: 2019-11-12; 修回日期: 2020-02-20

作者简介:

刘健(1967—), 男, 通信作者, 博士, 总工程师, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: powersys@263.net

王浦任(1994—), 男, 硕士, 主要研究方向为配电网及其自动化技术;

张志华(1987—), 男, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向为配电网及其自动化技术。

(编辑 张爱琴)