

# 基于短路电流小半波特征的短路故障快速检测方法

吴行健, 石晶, 陈红坤, 陈磊, 陈璟瑶

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 为使超高压输电线路上的限流器在短路早期快速投入, 短路故障快速检测方法的研究至关重要。首先分析了短路电流暂态特征随故障初相角等因素的变化规律, 发现部分故障初相角短路工况下电流呈现小半波特征的现象, 此时传统检测方法难以满足速动性的要求。然后提出了一种基于短路电流小半波特征的检测判据, 利用电流瞬时值或变化率的零点间隔作为检测量, 与传统检测判据配合, 实现了任意故障初相角下的短路快速检测, 并保证了在负荷投切等干扰工况下的可靠性。最后通过离线仿真、现场短路试验验证了该方法的有效性。结果表明所提方法能在 2.9 ms 内辨识出短路故障。

**关键词:** 短路故障快速检测; 故障电流初相角; 小半波特征; 零点间隔; 现场短路试验

## Fast short-circuit fault detection method based on a small half-wave feature

WU Xingjian, SHI Jing, CHEN Hongkun, CHEN Lei, CHEN Jingyao

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** To put the fault current limiter on a UHV transmission line into operation quickly in the early stage of a fault, research is conducted on a fast short-circuit fault detection method. First, the transient characteristics of the short-circuit current with initial phase angle and other factors are analyzed, and it is found that the early short-circuit current at some initial phase angle presents small half-wave characteristics. The traditional detection method finds it difficult to meet the speed requirements for action. Then, a detection criterion based on the small half-wave characteristic of the short-circuit current is proposed. This uses the zero-crossing time interval of the instantaneous value or of the rate of change to quickly identify short-circuit faults. The fast detection of a short-circuit fault at any fault initial phase angle can be realized by combining with the traditional criterion, and the reliability under load switching and other interference conditions is guaranteed. Finally, the effectiveness of the fault detection method is verified by offline simulation tests and a field short circuit test. The test results indicate that the detection time of the proposed method can be within 2.9 ms.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904300).

**Key words:** fast short-circuit fault detection; initial phase angle of fault current; small half-wave feature; zero-crossing time interval; field short circuit test

## 0 引言

随着电力系统负荷的增长以及电网耦合程度的加深, 电网的短路电流水平日益增长, 成为制约我国电力系统安全稳定运行的主要问题之一。其中, 华东电网短路电流超标最为严重, 有 19.1% 的变电站短路电流超过了 63 kA (目前 500 kV 断路器的遮断容量上限), 并且随着特高压变电站的接入, 问题

日益严峻<sup>[1-4]</sup>。广东电网已有多个 500 kV 站点的母线短路电流水平超过了断路器的遮断容量, 对电网运行安全构成威胁, 因此, 短路电流限制技术成为当下的研究重点。

目前应对超高压电网短路电流超标问题, 有 3 种常见解决方式: 调整电网结构、改变系统的运行方式和加装限流设备<sup>[5-11]</sup>。装设运行灵活、性能良好、经济合理的故障电流限制器 (Fault Current Limiter, FCL) 已成为当下有效且可行的方案。当电力系统发生短路故障时, FCL 必须先于高压交流断路器动作, 因此希望 FCL 的控制系统能够在 2~3 ms

内识别出短路故障, 使得 FCL 投入电网, 以限制短路电流给系统或设备带来热稳定和动稳定的冲击。并且, 要求 FCL 控制系统在各种干扰工况下不会误动。

经过长期研究, 国内外学者提出了许多短路故障检测方法<sup>[12-19]</sup>, 但仍然难以同时满足快速性和可靠性的要求。文献[12]提出基于电流瞬时值变定值的故障检测方法, 通过快速检测电路将整定值与正常工作电流同步, 理论上可以提高故障识别的速度, 但该方法对硬件设备要求高, 尚缺乏相关试验研究。文献[13-14]将三相电流平方和的比值作为故障检测量, 对所提方法在故障工况与干扰工况下的有效性进行了详细分析, 结果表明该方法在三相短路故障工况下检测时间短, 但在部分故障电压初相角的单相接地故障工况下检测时间过长, 并且无法判断故障相别, 难以实现快速开关的分相控制。文献[15]结合华东电网故障电流限制器示范工程, 提出了基于瞬时值和斜率配合的故障检测方法, 将两种判据在 5 ms 内相继达到整定值认定为 FCL 检测到故障, 已经通过多年工程实践检验, 但该方法在部分故障初相角的短路工况下仍然存在快速检测的“盲区”。文献[16]在上述研究的基础上, 采用相电流差替代电流斜率进行故障快速检测, 有效缩短了总体检测时间, 基于现场短路电流数据验证了该方法可以在 10 ms 内检测到故障, 但对于上述方法存在的快速检测“盲区”问题并无改善。综上所述, 目前应用于 FCL 控制系统的故障快速检测方法在部分故障初相角的短路工况下难以满足速动性的要求, 如何实现任意故障初相角的短路工况下快速、可靠地识别出短路故障, 仍需要进行不断探索, 寻找出具备普适性的故障快速检测方法<sup>[20-22]</sup>。

针对上述问题, 本文提出一种基于短路电流小半波特征的短路故障快速检测方法。首先分析了输电线路发生短路故障时电流暂态特征的变化规律, 发现了部分故障初相角下短路早期电流呈现瞬时值或变化率小半波的现象, 揭示了小半波特征是传统故障检测方法难以在任意短路故障初相角的短路工况下满足速动性的根本原因。根据小半波特征的特点, 提出了零点间隔判据, 利用电流瞬时值或变化率的过零点时间间隔进行故障辨识, 与电流瞬时值判据、电流变化率判据配合形成故障快速检测融合方法, 为超高压输电线路短路故障快速检测技术提供了新的思路。依托南方电网 500 kV 超高压电网故障电流限制器示范工程项目, 结合离线仿真与现场人工短路试验验证了所提方法的有效性。

## 1 短路电流暂态特征变化规律

### 1.1 短路早期电流小半波特征

为实现任意故障初相角短路工况下的快速检测, 需对短路早期电流暂态特征的变化规律进行详细分析, 利用电力系统单线等效模型进行研究, 模型示意图如图 1 所示, 其余两相电流的变化规律可同理分析。图中  $E_m$ 、 $E_n$  为电源,  $R+R'$  和  $L+L'$  为输电线路等效电阻和电感,  $i$  为线路电流。

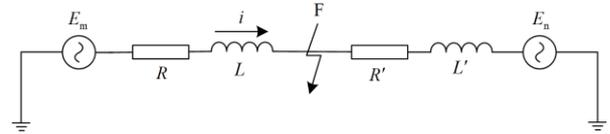


图 1 电力系统单线等效模型

Fig. 1 Single phase equivalent model of power system

假设短路故障前线路电流为

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (1)$$

式中:  $I_m$  为短路故障前稳态电流幅值;  $\alpha$  为故障电压初相角;  $\varphi$  为短路故障前线路阻抗角, 电力系统正常运行时功率因数为 0.95~1, 即  $\varphi \approx 0^\circ$ 。

当 F 点发生短路故障, 由于电感电流不突变, 短路发生后的全电流公式为

$$i(t) = I'_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi') + I_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

其中

$$I_1 = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I'_m \sin(\alpha - \varphi') \quad (3)$$

式中:  $I'_m$  为短路故障后稳态电流幅值;  $\varphi'$  为短路故障后线路阻抗角, 由于输电线路电抗远大于电阻值, 因此  $\varphi' \approx 90^\circ$ ;  $\tau$  为衰减时间常数, 500 kV 高压输电线路中  $\tau$  通常为 80~100 ms<sup>[23]</sup>。

由式(3)可知, 当输电线路发生短路故障前后, 稳态电流幅值和线路阻抗角均发生了跳变, 为更加直观地分析故障初相角对短路早期电流暂态特征的影响, 本文定义了幅值跳变量  $n$ 、相位跳变量  $\Delta\varphi$  和故障电流初相角  $\beta$ , 见式(4)~式(6)。

$$n = \frac{I'_m}{I_m} \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi \quad (5)$$

$$\beta = \alpha - \varphi' \quad (6)$$

由此对全电流公式进行简化, 得到短路电流暂态特征与  $n$ 、 $\Delta\varphi$  及  $\beta$  的非线性变化关系, 见式(7), 短路电流可看作是初相位为  $\beta$  的正弦分量  $i_{ac}(t)$  与初值为  $(I_m \sin(\beta + \Delta\varphi) - I'_m \sin(\beta))$  的衰减直流分量  $i_{dc}(t)$  的叠加。

$$i(t) = i_{ac}(t) + i_{dc}(t) = nI_m \sin(\omega t + \beta) + (I_m \sin(\beta + \Delta\varphi) - nI_m \sin(\beta))e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

此时，两个分量的初值可以表示为

$$\begin{cases} I_{ac0} = nI_m \sin(\beta) \\ I_{dc0} = I_m \sin(\beta + \Delta\varphi) - nI_m \sin(\beta) \end{cases} \quad (8)$$

在大多数情况下，500 kV 及以上电压等级交流输电线路发生短路故障前存在两种运行状态：线路带载运行和线路空载，线路电流分别呈现阻性和容性<sup>[24]</sup>，在这两种情况下发生短路故障将使得短路电流产生不同的相位跳变，即  $\Delta\varphi$  存在差异，本文分别进行讨论，对应下文工况 1 和工况 2。

工况 1 发生短路故障时， $\Delta\varphi$  接近于  $90^\circ$ ，以  $n=2$  为例，可以绘制出  $I_{ac0}$  和  $I_{dc0}$  随  $\beta$  的变化曲线，如图 2 所示。

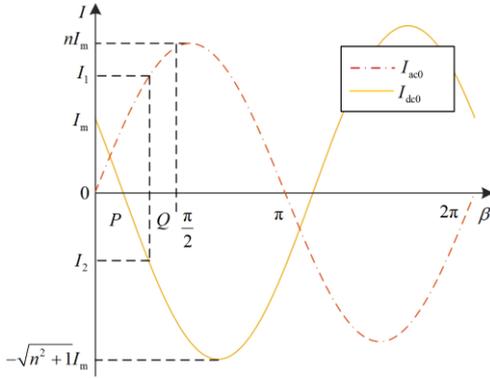


图 2  $I_{ac0}$ 、 $I_{dc0}$  随  $\beta$  的变化曲线(工况 1)

Fig. 2 Variation curve of  $I_{ac0}$  and  $I_{dc0}$  with  $\beta$  (Condition 1)

由图 2 易知， $I_{ac0}$ 、 $I_{dc0}$  均呈现出正弦变化规律， $\beta \in [0, \pi]$  和  $\beta \in [\pi, 2\pi]$  条件下的电流波形完全对称，因此只需对  $\beta \in [0, \pi]$  进行讨论。当  $\beta \in [0, \pi]$  时， $I_{ac0}$  均为正值。图 2 中  $P$  为  $I_{dc0}$  的过零点，当  $\beta \in [0, P]$  时， $I_{dc0}$  为正值，而当  $\beta \in [P, \pi]$  时， $I_{dc0}$  为负值。根据图 2 中的关系曲线，确定已知  $\beta$  下的短路电流各分量初值  $I_{ac0}$  和  $I_{dc0}$ ，再结合式(7)，可得短路电流随时间  $t$  的变化规律。在图 2 中任意选取一点  $\beta=Q$  为例，此时  $I_{ac0} = I_1$ 、 $I_{dc0} = I_2$ ，短路电流随时间  $t$  的变化规律如图 3 所示。

当  $\beta \in [0, P]$  时，在故障早期  $I_{ac0}$ 、 $I_{dc0}$  为正值，正弦分量的变化率  $di_{ac}/dt$  也为正值且处于加速增大阶段，因此短路电流在短时间内将快速上升。当  $\beta \in [\pi/2, \pi]$  时，在故障早期  $I_{ac0}$ 、 $I_{dc0}$  正负性相反，短路电流初值较小， $di_{ac}/dt$  为负且处于加速减小阶段，同时直流衰减分量为负值，此时短路电流将在短时间内快速下降。以上两种工况下短路电流瞬时

值、变化率等单点特征量会在短路故障发生后迅速与正常运行电流产生显著差异，因此通过实时比较这些特征量的变化即可实现短路快速检测，能够满足 FCL 控制器速动性的要求。但当  $\beta \in [P, \pi/2]$  时， $I_{ac0}$ 、 $I_{dc0}$  正负性相反，短路电流初值较小，正弦分量与直流衰减分量的叠加方向相反， $di_{ac}/dt$  由正值逐渐减小且正负性会在短路后 1/4 个周波内发生一次转变，如图 3 所示，将导致短路后第一个波峰峰值与正常运行电流幅值相近，工况 1 下，电流小半波示意图如图 4 所示。

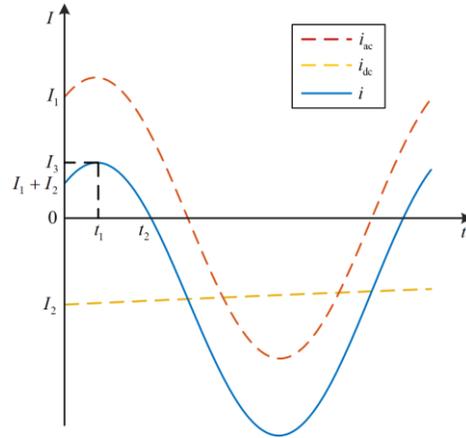


图 3 短路后电流随  $t$  的变化曲线(工况 1)

Fig. 3 Variation curve of short-circuit current with  $t$  (Condition 1)

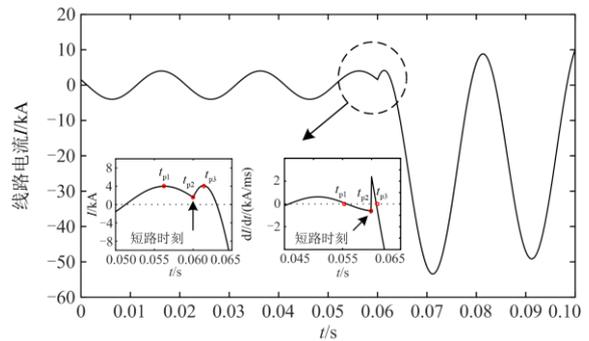


图 4 电流小半波示意图(工况 1)

Fig. 4 Schematic diagram of small half-wave short-circuit current (Condition 1)

图 4 中，故障发生时刻  $t_{p2}$  为 0.060 s， $n=7$ ， $\Delta\varphi=90^\circ$ ， $\beta=\pi/3$ ，放大图对应故障发生前后的电流瞬时值与电流变化率。 $t_{p1}$  和  $t_{p3}$  分别为故障发生前一个电流瞬时值波峰的峰值时刻和故障发生后第一个电流瞬时值波峰的峰值时刻，这两个时刻同时也是电流变化率的过零时刻。由图 4 可以观察到，短路电流在故障早期并没有快速上升或下降，电流

特征量大小与正常运行电流的取值区间无异, 短路电流瞬时值第一个过零点位于短路后 3~4 ms, 传统故障快速检测方法在此工况下难以快速辨识到短路故障。根据短路前后电流特征, 短路后电流瞬时值第一个过零点距上一过零点的时间间隔将大于半个周波, 而电流变化率在短路前后极短时间内存在两次过零, 此工况下的电流小半波特征与通常意义上的电流小半波特征有所不同, 小半波特征不再由电流瞬时值特征来体现, 而是由电流变化率特征来体现, 本文将其定义为电流变化率小半波。

另一种情况下, 当工况 2 发生短路故障时,  $\Delta\varphi$  接近  $180^\circ$ ,  $I_{ac0}$  和  $I_{dc0}$  随  $\beta$  的变化曲线如图 5 所示。

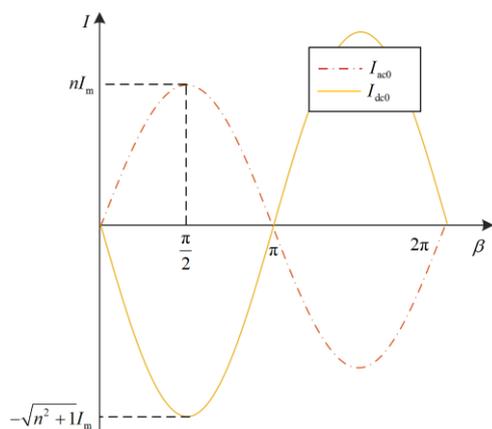


图 5  $I_{ac0}$ 、 $I_{dc0}$  随  $\beta$  的变化曲线(工况 2)

Fig. 5 Variation curve of  $I_{ac0}$  and  $I_{dc0}$  with  $\beta$  (Condition 2)

由图 5 可知, 当  $\beta \in [0, \pi]$  时,  $I_{ac0}$  均为正值,  $I_{dc0}$  均为负值。与上一种情况同理分析, 当  $\beta \in [0, \pi/2]$  时,  $I_{ac0}$ 、 $I_{dc0}$  的正负性相反, 且  $di_{ac}/dt$  的正负性在短路后 1/4 个周波内会发生一次转变, 使短路早期电流呈现出另一种小半波特征, 工况 2 下, 电流小半波示意图如图 6 所示。而  $\beta \in [\pi/2, \pi]$  时, 由于短路电流初值、 $I_{dc0}$  和  $di_{ac}/dt$  均为负值, 因此短路早期电流瞬时值将快速下降, 不会出现小半波特征。

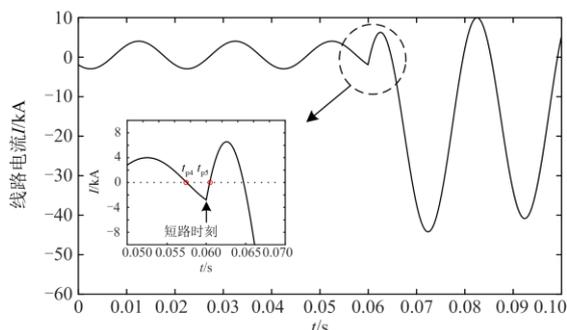


图 6 电流小半波示意图(工况 2)

Fig. 6 Schematic diagram of small half-wave short-circuit current (Condition 2)

图 6 中, 故障发生时刻为 0.060 s,  $n=7$ ,  $\Delta\varphi=180^\circ$ ,  $\beta=\pi/4$ ,  $t_{p4}$  和  $t_{p5}$  分别为短路前后电流瞬时值的过零时刻。由图 6 可以观察到, 此工况下的电流小半波特征与工况 1 中的小半波特征有所区别, 电流瞬时值在短路前后的短时间内存在两次过零, 本文将其定义为电流瞬时值小半波。此时故障早期短路电流的特征量大小也与正常运行电流没有明显区别, 同样会给短路故障快速检测带来困难。

## 1.2 短路电流小半波的影响因素

上文发现了部分故障初相角下短路早期电流呈现小半波特征的现象, 希望通过理论分析进一步得到电流小半波特征下  $n$ 、 $\Delta\varphi$  及  $\beta$  之间的关系。式(7)中, 短路电流正弦分量的变化较衰减直流分量快, 因此可以近似认为短路后电流瞬时值第一个峰值出现的时刻与短路电流正弦周期分量第一个峰值出现时刻十分接近, 各种短路工况下的仿真测试表明, 上述两个时刻的偏差在 0.1 ms 以内。根据以上假设内容, 易得电流小半波峰值出现的时刻为

$$t = \left\lfloor \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) / \omega \right\rfloor \quad (9)$$

当  $\beta \in [0, \pi]$  时, 短路早期  $t=0 \sim 5$  ms, 此时直流分量的衰减可以近似忽略。由 1.1 节分析可知, 电流小半波特征下短路早期电流特征量与正常运行电流相近, 短路电流第一个峰值的大小与正常运行电流幅值相等时, 对故障快速检测来说极为不利, 本文以此种情况为例进行分析, 推导得到该工况的电流小半波特征下  $n$ 、 $\Delta\varphi$  和  $\beta$  之间的关系式为

$$1 = n + \sin(\beta + \Delta\varphi) - n \sin \beta \quad (10)$$

选取不同的  $n$  和  $\Delta\varphi$  计算  $\beta$ , 得到  $n$ 、 $\Delta\varphi$  和  $\beta$  的非线性关系图, 如图 7 所示。

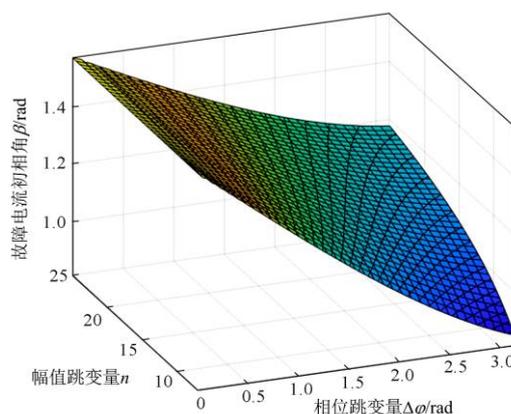


图 7 电流小半波特征下  $n$ 、 $\Delta\varphi$  和  $\beta$  的关系图

Fig. 7 Diagram of  $n$ ,  $\Delta\varphi$  and  $\beta$  under the characteristic of small current half-wave

由图 7 可知, 当  $\Delta\varphi$  接近于  $90^\circ$ ,  $n$  在  $[7, 25]$  内时, 对应 1.1 节分析的第一种情况, 短路电流小半波特征出现的条件为  $\beta \in [66^\circ, 73^\circ]$ ; 当  $\Delta\varphi$  接近于  $180^\circ$ ,  $n$  在  $[7, 25]$  内时, 对应 1.1 节分析的第二种情况, 短路电流小半波特征出现的条件为  $\beta \in [48^\circ, 67^\circ]$ 。当  $n$  分别为 7 和 25,  $\Delta\varphi \in [0^\circ, 180^\circ]$  时, 短路电流小半波特征出现的条件分别为  $\beta \in [48^\circ, 90^\circ]$  和  $\beta \in [67^\circ, 90^\circ]$ 。根据上述分析得到了短路电流小半波特征下  $n$ 、 $\Delta\varphi$  和  $\beta$  之间的关系, 给出了小半波特征下  $\beta$  的取值范围, 分析结果与 1.1 节研究内容相互论证。与此同时, 本节分析结果表明, 电流小半波特征在不同短路电流水平的短路工况下均会出现, 目前工程上已经运用的传统故障快速检测判据尚不能保证任意故障初相角的短路工况下检测的快速性。

## 2 基于零点间隔的短路故障快速检测判据

### 2.1 判据原理

通过第 1 节的分析可知, 短路电流小半波工况下故障早期的电流特征量与正常运行电流没有明显差别, 基于单点信息量的检测判据如电流瞬时值、变化率、相电流差等判据无法实现短路故障的快速检测。对电流小半波特征深入分析后发现, 在电流变化率小半波和电流瞬时值小半波特征下, 短路早期电流的瞬时值和变化率在短时间内存在两次过零, 过零点之间的时间间隔小于  $1/4$  个周波, 与工频电流过零的规律存在明显区别。结合这一特性, 提出了基于过零点时间间隔的故障快速检测判据(下文简称为零点间隔判据), 将电流瞬时值或变化率过零点时间间隔作为故障检测量, 同时利用短路前后的电流特征信息, 可以实现电流小半波工况下的故障快速检测。判据计算瞬时值/变化率过零点的具体原理分别见式(11)和式(12), 假设当前时刻为  $k$ , 此时电流的瞬时值为  $i_k$ , 变化率为  $di_k$ , 上一个电流瞬时值为  $i_{k-1}$ , 变化率为  $di_{k-1}$ , 计算连续两个采样值的乘积, 通过判断乘积值的正负性, 得出当前采样点是否为电流瞬时值或变化率的过零点, 若为过零点, 则记录下当前时刻  $k$  值。同理, 判断下一过零点时刻  $n$  后, 通过式(13)计算过零点之间的间隔, 并判断是否满足判据条件, 若满足则认为可能发生了短路故障。除此之外, 为避免过零时刻两采样值中存在零值影响短路判断, 当前时刻采样值与  $k-2$  时刻采样值需再进行一次过零判断, 提高了方法的容错率。

$$\begin{cases} i_n \cdot i_{n-1} < 0 \parallel i_n \cdot i_{n-2} < 0 \\ i_k \cdot i_{k-1} < 0 \parallel i_k \cdot i_{k-2} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} di_n \cdot di_{n-1} < 0 \parallel di_n \cdot di_{n-2} < 0 \\ di_k \cdot di_{k-1} < 0 \parallel di_k \cdot di_{k-2} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$a < (n-k)f < b \quad (13)$$

式中:  $f$  为采样频率;  $b$  为过零点时间间隔的上限, 根据 1.1 节的分析,  $b$  值选取为  $1/4$  个周波, 即  $5 \text{ ms}$ ;  $a$  为过零点时间间隔的下限, 选取时考虑判据的抗干扰性, 避免线路空载时环境噪声等因素引起判据误动, 本文中  $a$  值取  $1 \text{ ms}$ 。

### 2.2 短路故障快速检测方法

根据超高压系统 FCL 的动作要求, 高短路电流水平工况下 FCL 应快速动作, 降低短路电流对系统的危害, 保证断路器的正常开断; 在线路正常运行、负荷投切、功率补偿、低短路电流水平等工况下, FCL 应可靠不动作, 保证经济性。使用单一判据进行故障检测往往不能同时满足上述快速性和可靠性的要求, 目前应用于 FCL 运行控制系统的故障快速检测方法多采用两种检测判据相互配合的方案, 可有效提高检测方法的可靠性。

华东电网故障电流限制器示范工程采用了电流瞬时值与电流变化率判据相互配合的故障快速检测方法<sup>[13]</sup>, 但该方法无法保证任意故障初相角短路工况下短路检测的速动性要求, 后文将对比分析。

本文将零点间隔判据、电流瞬时值、电流变化率判据以“三选二”的方式进行配合, 得到新型故障快速检测方法, 方法框图如图 8 所示。其中,  $t_a$ 、 $t_{da}$  分别为电流瞬时值或变化率的零点间隔判据的检测量;  $i_a$ 、 $di_a$  分别为电流瞬时值和变化率判据的检测量;  $I_{SET1}$ 、 $I_{SET2}$  为电流瞬时值判据和变化率判据的整定值, 分别按预期短路电流水平下电流瞬时值和变化率的最大值整定;  $t_s$  为时间辅助判据。由于各判据满足条件的的时间不同, 第一个满足条件的判据为启动判据, 后满足条件的判据为确认判据, 当启动判据满足后需保持一段时间, 在保持时间内等待确认判据进行确认, 若没有另一个判据满足, 即认为此时为干扰工况, 由此实现判据间的配合。

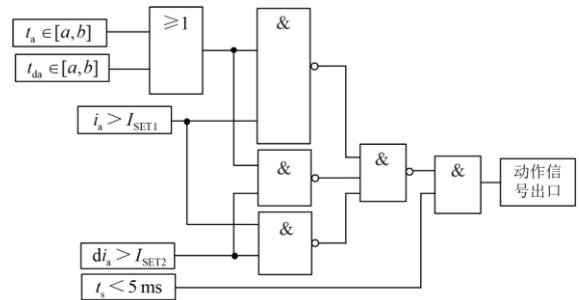


图 8 短路故障快速检测方法框图

Fig. 8 Block diagram of fast short-circuit fault detection method

### 3 仿真分析

为验证所提方法的有效性, 基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建了 500 kV 系统简化模型, 如图 9 所示, 线路模型采用频率相关模型, 参数采用广东电网某输电线路实际参数, 线路全长 66 km, 其中: 线路正序参数为  $r_1 = 0.011 \Omega/\text{km}$ ,  $x_1 = 0.271 \Omega/\text{km}$ ,  $c_1 = 0.013 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 零序参数为  $r_0 = 0.179 \Omega/\text{km}$ ,  $x_0 = 0.664 \Omega/\text{km}$ ,  $c_0 = 0.008 \mu\text{F}/\text{km}$ 。FCL 安装在母线 M 出线处, 调整电源电势与内阻抗, 使得在限流器未投入时线路首端单相短路电流水平达到 90 kA。通过改变故障位置、故障时刻、线路带载运行情况, 设置不同短路电流水平(10 kA、20 kA、30 kA、50 kA、70 kA、90 kA)和不同故障电压初相角( $0^\circ \sim 180^\circ$  每隔  $10^\circ$  测试一次)下的单相接地故障工况, 并使用两种不同的故障快速检测方法分别进行检测, 两种方法均按同一预期短路电流水平  $I_k$  进行整定,  $I_k$  设为 10 kA。其中, 方法一为本文所提方法, 方法二为目前工程上应用的电流变化率判据与电流瞬时值判据配合的检测方法, 工况 1、2 分别为短路前线路带载运行和空载两种情况。记录不同短路工况下两种方法的最长和最短检测时间, 并绘制检测时间特性曲线, 如图 10 所示。

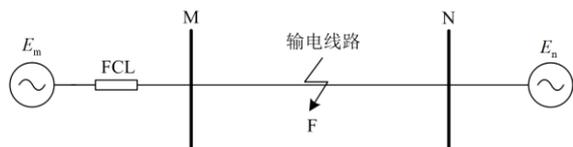


图 9 500 kV 系统简化模型

Fig. 9 Simplified model of 500 kV system

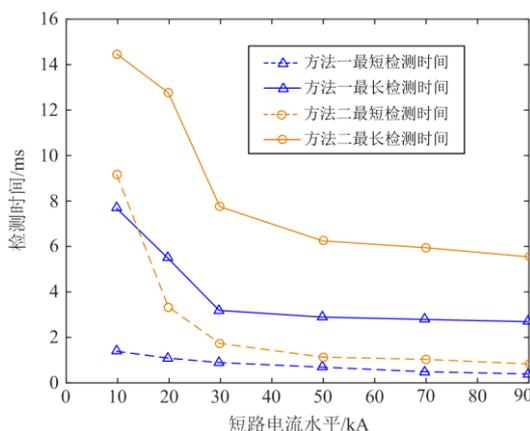


图 10 不同故障快速检测方法响应特性曲线对比图

Fig. 10 Comparison of response characteristics of different detection methods

由图 10 可知, 在预期短路电流水平以上的短路工况下, 方法一最长和最短的检测时间均低于方

法二, 证明零点间隔判据对故障快速检测方法的快速性有明显提升。此外, 方法一与方法二的检测时间在不同短路电流水平条件下均呈现反时限特性, 短路电流水平越高, 检测时间越短。在短路电流水平为 30 kA 以上时, 方法一的检测时间小于 2.9 ms, 完全能够满足限流器控制器的动作要求。

以工况 1 条件下短路电流水平为 30 kA、不同故障电压初相角的短路工况为例, 两种方法的检测时间见表 1。其中判据 1 为电流瞬时值判据, 判据 2 为电流变化率判据, 判据 3 为零点间隔判据。分析仿真结果可知, 零点间隔判据在故障电压初相角为  $130^\circ \sim 170^\circ$  的短路工况下满足判断条件, 加速了方法对短路故障的判断。方法一最长检测时间通常出现在故障电压初相角为  $180^\circ$  的短路工况下, 根据判据间的配合关系, 此时确认判据为电流瞬时值判据, 检测时间为 2.9 ms。方法二的仿真结果与文献[18]相似, 从另一方面验证了结果的有效性, 最长检测时间出现在故障电压初相角为  $130^\circ$  的短路工况下, 短路电流形态特征与图 4 所示的小半波特征相似, 此时方法二的检测时间取决于电流瞬时值判据的检测时间, 为 7.8 ms。而对于方法一, 此时零点间隔判据中变化率零点间隔满足判断条件, 在短路后 0.2 ms 辨识到故障, 检测时间取决于电流变化率判据的检测时间, 为 1.0 ms, 由此可见, 零点间隔判据有效缩短了整体的检测时间。

表 1 30 kA 短路电流水平短路工况下两种方法的检测时间(工况 1)

Table 1 Detection time of fault detection method under 30 kA short-circuit current level (Condition 1)

故障初相角/ $^\circ$	判据 1 / ms	判据 2 / ms	判据 3 / ms	方法 1 / ms	方法 2 / ms
0	2.8	1.4	—	2.8	2.8
10	2.7	1.0	—	2.7	2.7
20	2.2	0.7	—	2.2	2.2
30	1.9	0.7	—	1.9	1.9
40	1.7	0.6	—	1.7	1.7
50	1.5	0.6	—	1.5	1.5
60	1.4	0.6	—	1.4	1.4
70	1.9	0.7	—	1.9	1.9
80	1.8	0.7	—	1.8	1.8
90	1.8	0.6	—	1.8	1.8
100	1.3	0.6	—	1.3	1.3
110	1.3	0.6	—	1.3	1.3
120	1.6	0.7	—	1.6	1.6
130	7.8	1.0	0.2	1.0	7.8
140	7.0	1.1	0.2	1.1	7.0
150	5.4	1.3	0.4	1.3	5.4
160	4.6	2.2	0.6	2.2	4.6
170	3.8	1.8	0.9	1.8	3.8
180	2.9	1.7	—	2.9	2.9

同理，对工况 2 条件下的仿真结果也进行了分析，两种方法的检测时间如图 11 所示。由图 11 可知，在故障电压初相角为  $30^\circ \sim 90^\circ$ 、 $110^\circ \sim 180^\circ$  的短路工况下，方法一的检测时间短于方法二。故障初相角为  $110^\circ \sim 180^\circ$  的短路工况下短路前后电流波形与图 6 类似，电流瞬时值零点间隔满足判断条件，零点间隔判据能在  $0.2 \sim 1.0$  ms 内检测出短路故障，缩短了方法的整体检测时间。故障初相角为  $30^\circ \sim 90^\circ$  的短路工况下电流波形不呈现为小半波特征，短路前电流波形与图 4 中的情况相似，短路后电流波形呈现大半波特征，由于短路前后电流变化率存在两次相近的过零点，与工况 1 中小半波特征下变化率零点间隔规律相同，零点间隔判据也能在  $0.1 \sim 0.4$  ms 内快速辨识到短路故障。由此可见，零点间隔判据在小半波特征之外的部分短路工况也能起到缩短短路故障检测时间的作用。

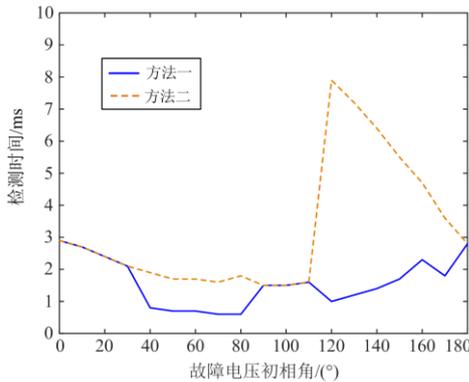


图 11 30 kA 短路电流水平短路工况下两种方法的检测时间(工况 2)

Fig. 11 Detection time of fault detection method under 30 kA short-circuit current level (Condition 2)

除此之外，为验证方法的可靠性，设置了噪声、谐波、负荷投切、功率补偿等干扰工况，负荷设置于母线 N 处，通过断路器实现投切操作，具体参数见表 2。仿真结果表明，本文所提方法在以上干扰工况下均不会误动，满足限流器的运行要求。

表 2 干扰工况试验参数

Table 2 Interference conditions experiment parameters

工况	参数
空载投满负荷/MVA	2000
负荷投切/MVA	500
负荷投切/MVA	1000
电容投切/Mvar	100
3 次谐波/p.u.	0.5
5 次谐波/p.u.	0.25
高斯白噪声/dB	40
高斯白噪声/dB	20
脉冲	0.25 p.u.(0.5 ms)
脉冲	1 p.u.(2 ms)

综上所述，本文所提方法能够有效消除部分故障初相角短路工况下快速检测的“盲区”，实现任意故障初相角短路工况下的快速检测，与目前工程上应用的方法在快速性上相比存在优势，并且具有较高的可靠性，为故障快速检测技术提供了新的思路。

#### 4 现场人工短路试验验证

依托南方电网 500 kV 超高压电网故障电流限制器示范工程项目，于广东电网某输电线路 13 km 处进行了 B 相接地人工短路试验，试验前线路为空载，预计短路电流水平为 19 kA。试验采用无人机驱动的高压输电线路瞬时短路试验方法。FCL 运行控制系统采样频率为 10 kHz，采用本文所提方法对短路故障进行辨识。FCL 与线路串联，使用罗氏线圈采集电流信号，FCL 拓扑结构及罗氏线圈安装位置如图 12 所示，FCL 未投入时为双臂通流，因此 FCL 采集的电流为线路电流的一半，考虑 FCL 结构和所提方法的响应特性，对双臂电流 6.6 kA(单臂 3.3 kA)进行整定。FCL 控制系统中电流瞬时值与电流变化率的录波波形如图 13 所示。

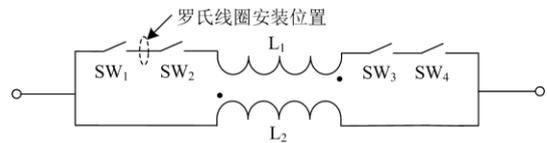


图 12 FCL 拓扑结构及罗氏线圈安装位置

Fig. 12 FCL Rogowski coil topological structure and installation position

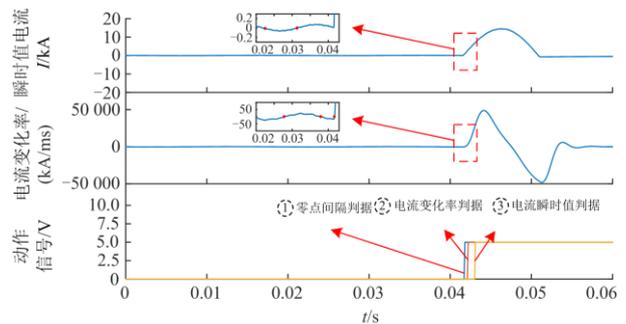


图 13 现场短路试验电流及动作信号波形

Fig. 13 Waveform of field short-circuit test current and action signal

试验结果表明，FCL 运行控制系统的总体检测时间为 0.7 ms，经过 9.5 ms 后开关快速开断，限流器进入限流态。由图 13 可知，故障发生时刻为 0.0415 s，单臂短路电流水平为 9.54 kA，电流峰值为 14.7 kA。对比分析故障录波仪中电流和电压波形得知，短路前线路电流呈容性，大小为 48.81 A，故

障电压初相角为  $85^\circ$ 。根据录波波形中的动作信号波形, 零点间隔判据识别时间为  $0.3\text{ ms}$ , 电流变化率判据识别时间为  $0.7\text{ ms}$ , 电流瞬时值判据识别时间为  $1.6\text{ ms}$ 。试验结果与理论分析一致, 零点间隔判据能够有效缩短方法对短路故障的检测时间。

此外, 在现场短路试验前的升流( $200\text{ A}$ 、 $400\text{ A}$ 、 $600\text{ A}$ )试验及断路器合闸、线路空充等试验操作下, 方法均未误动, 方法的可靠性也同时得到了验证。

## 5 结论

本文提出了一种基于短路电流小半波特征的故障快速检测判据, 与电流瞬时值判据、电流变化率判据配合, 可用于 FCL 等非自触发快速开关型的电流开断装置, 提高开断装置的响应速度。主要工作及研究结论如下。

1) 分析了短路电流暂态特征随故障初相角、相位跳变量、幅值跳变量变化的规律, 发现了部分故障初相角下短路早期电流呈现小半波特征的现象, 揭示了小半波特征是传统故障检测方法难以在全故障初相角下满足速动性的根本原因。

2) 提出了基于小半波特征的故障快速检测方法, 利用电流瞬时值或变化率的过零点时间间隔作为检测量, 能够有效消除部分故障初相角短路工况下快速检测的“盲区”, 与电流瞬时值、变化率判据配合, 可以实现任意故障初相角短路工况下的短路故障快速检测。

3) 通过离线仿真试验、现场人工短路试验, 验证了所提方法的有效性, 所提出的识别方法比目前工程中采用的方法快速性更好, 为故障快速检测技术提供了新的思路。

## 参考文献

- [1] 王晨, 徐建霖. 混合型限流及开断技术发展综述[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1644-1653.  
WANG Chen, XU Jianlin. Review of hybrid current limiting and breaking technology development[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1644-1653.
- [2] 艾琳, 冯艳虹, 陈为化, 等. 特高压接入京津冀北  $500\text{ kV}$  电网短路电流问题及限流措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 133-137.  
AI Lin, FENG Yanhong, CHEN Weihua, et al. Research on short-circuit current problem and limiting measures caused by UHV substation connecting to  $500\text{ kV}$  network in Beijing-Tianjin Area and Northern Hebei[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 133-137.
- [3] 全月, 王志远, 李彬彬, 等. 集成直流断路器功能的高压大容量 DC/DC 变换器[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 46-54.  
QUAN Yue, WANG Zhiyuan, LI Binbin, et al. A high-voltage large-capacity dc/dc converter integrated with the function of DC circuit breaker[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 46-54.
- [4] 何泽宇, 陈小月, 张杏子, 等. 区域电网电磁暂态等值及短路电流直流分量分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20): 10-15.  
HE Zeyu, CHEN Xiaoyue, ZHANG Xingzi, et al. Analysis of DC component of electromagnetic transient equivalent and short-circuit current in regional power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20): 10-15.
- [5] 徐帅, 杜钦君, 张晓飞, 等. 新型限流式统一潮流控制器限流分析与参数设计[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 558-565.  
XU Shuai, DU Qinjun, ZHANG Xiaofei, et al. Current limiting analysis and parameter design of a novel UPFC with fault current limiter[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 558-565.
- [6] LIANG Zhigang, LIN Xinchun, KANG Yong, et al. Short circuit current characteristics analysis and improved current limiting strategy for three-phase three-leg inverter under asymmetric short circuit fault[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7214-7228.
- [7] 刘俊翔, 叶菁菁, 袁召, 等. 一种基于高耦合分裂电抗器的  $500\text{ kV}$  限流器拓扑[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2828-2837.  
LIU Junxiang, YE Jingjing, YUAN Zhao, et al. A topology of  $500\text{ kV}$  fault current limiter based on a high coupling split reactor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2828-2837.
- [8] 李锋, 樊艳芳, 王晓飞, 等. 限流串抗器接入电网对继电保护的影响及整定原则研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 118-123.  
LI Feng, FAN Yanfang, WANG Xiaofei, et al. Influence of current limiting series reactor connected to the power grid on relay protection and research on the principle of the corresponding setting[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 118-123.
- [9] SADEGHKHANDI I, HAMEDANI G M, GUERRERO J, et al. A current limiting strategy to improve fault ride-through of inverter interfaced autonomous microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2138-2148.
- [10] SUGIMOTO S, KIDA J, ARITA H, et al. Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 842-847.
- [11] LI Chao, LI Bin, GUO Fengrui, et al. Studies on the active

- SISFCL and its impact on the distance protection of the EHV transmission line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 164-169.
- [12] 王久和, 滕国仁, 朱小龙, 等. 井下短路电流快速检测的研究[J]. 电工技术杂志, 2002(6): 22-23.  
WANG Jiuhe, TENG Guoren, ZHU Xiaolong, et al. Study on fast detection of short circuit current in underground mine pit[J]. Electrotechnical Journal, 2002(6): 22-23.
- [13] JARRAHI M, SAMET H, GHANBARI T. Fast current-only based fault detection method in transmission line[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(2): 1725-1736.
- [14] 李奕璋, 陈红坤, 石晶, 等. 基于三相电流平方和比值的短路故障快速检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 111-119.  
LI Yizhang, CHEN Hongkun, SHI Jing, et al. A fast short-circuit fault detection method based on the ratio of three-phase currents square sum[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 111-119.
- [15] 金雪芬, 戴朝波, 武守远, 等. 根据线路电流斜率快速识别故障信号的方法[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 29-34.  
JIN Xuefen, DAI Chaobo, WU Shouyuan, et al. Fast fault signal identification method using line current slope[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 29-34.
- [16] 杨尚瑾, 戴朝波, 李芳灵, 等. 基于相电流差的短路故障快速识别方法[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2330-2335.  
YANG Shangjin, DAI Chaobo, LI Fangling, et al. Fast short-circuit fault identification method based on phase current difference[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2330-2335.
- [17] 李小鹏, 丁宣文, 束洪春, 等. 基于多重分形谱的交流输电线路故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 1-10.  
LI Xiaopeng, DING Xuanwen, SHU Hongchun, et al. A fault identification method of an AC transmission line based on a multifractal spectrum[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 1-10.
- [18] 刘健, 王浦任, 张志华. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 57-64.  
LI Jian, WANG Puren, ZHANG Zhihua. Improved fast fault detection algorithm on instantaneous current and its variation for current limitation control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 57-64.
- [19] MOHAMED S M, SUNDARARAJAN P, SASONGKO F, et al. Short circuit detection and fault current limiting method for IGBTs[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2020, 20(4): 686-693.
- [20] 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.
- [21] 戴朝波. 故障电流限制器用故障识别技术综述[J]. 智能电网, 2014, 2(3): 22-29.  
DAI Chaobo. Review on fault detection method for fault current limiter[J]. Smart Grid, 2014, 2(3): 22-29.
- [22] 吴浩伟, 周樾, 孙朝晖, 等. 电力系统短路故障快速检测方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 88-92.  
WU Haowei, ZHOU Liang, SUN Zhaohui, et al. Study on fast detecting scheme of power system short-circuit fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 88-92.
- [23] 曹炜, 王永生, 张文青, 等. 电力系统短路电流直流分量及其对断路器开断能力的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 283-288.  
CAO Wei, WANG Yongsheng, ZHANG Wenqing, et al. Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 283-288.
- [24] 楼晓轩, 宋平, 徐栋杰, 等. 基于空充电流的线路保护带负荷试验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 129-134.  
LOU Xiaoxuan, SONG Ping, XU Dongjie, et al. On-load test of line protection based on no-load charging current[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 129-134.

收稿日期: 2021-10-21; 修回日期: 2022-01-04

作者简介:

吴行健(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为短路故障快速检测与辨识技术; E-mail: wuxingjian0426@163.com

石晶(1969—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为开关电器及理论电工; E-mail: shi.jing@whu.edu.cn

陈红坤(1967—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网运行与控制、电力系统安全评估、电能质量分析与环境评估。E-mail: chkinsz@163.com

(编辑 许威)