

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202083

## 基于暂态量的继电保护研究

郑博文<sup>1</sup>, 王增平<sup>1</sup>, 吕哲<sup>2</sup>, 王彤<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 电力电子化设备的广泛应用导致电力系统故障暂态过程更加复杂、快速, 对继电保护的“四性”提出了更高要求, 基于暂态量的继电保护优势更加凸显。首先介绍了电力电子化电力系统的故障特性, 详细分析了电力电子器件的快速调节特性与脆弱性以及电力系统故障特性的影响。其次全面梳理了暂态量在线路保护中的应用, 包括行波波头保护、单端暂态量保护等, 并进一步分析了基于双端(多端)暂态量的保护新原理和新方法。最后给出了对暂态量保护研究的建议, 通过合理利用故障全过程中丰富的暂态信息, 实现与故障信息自适应匹配的高速暂态量保护, 全面筑牢电网安全的“第一道防线”。

**关键词:** 交直流混联; 电力电子化; 暂态响应; 工频量保护

### Research on transient-based relay protection

ZHENG Bowen<sup>1</sup>, WANG Zengping<sup>1</sup>, LÜ Zhe<sup>2</sup>, WANG Tong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Wide application of power electronic equipment has made the fault transient process of a power system more complicated and faster. This forces higher requirements on the “four characteristics” of relay protection. Therefore, the advantages of transient-based relay protection have become more prominent. First, the fault characteristics of the electronic power system are introduced. The fast adjustment and fragility of power electronic devices and their influence on the fault characteristics of a power system are analyzed in detail. Secondly, the application of transient quantities in line protection is comprehensively established, including traveling wave front protection, single-ended transient protection, etc. Then, new principles and methods of protection based on double-ended (multi-terminal) transients are analyzed. Finally, suggestions for research on transient-based protection are given. By rationally using the abundant transient information in the entire fault process, high-speed transient-based protection which could adaptively be matched to the fault is realized, and the “first line of defense” for power grid security can be fully established.

This work is supported by National Key Research and Development of China (No. 2016YFB0900604), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W), and Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51637005).

**Key words:** AC-DC hybrid system; transient response; power-frequency protection

## 0 引言

继电保护是保障电网安全运行的第一道防线<sup>[1]</sup>。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900604); 国家电网公司科技项目资助(52094017000W); 国家自然科学基金重点资助(51637005)

在实际工程应用中, 反应工频电气量的继电保护占主导地位。随着电力电子化设备的广泛应用, 电力系统故障后呈现出更加复杂的故障特征, 工频量保护面临无法正确动作的问题。由于故障后的暂态量中蕴含着丰富的故障特征信息, 越来越多的学者对基于暂态量的继电保护进行了研究。早在1948年, 就有学者首次提出了利用行波测量输电线路故障距

离的思想; 20 世纪 60 年代末, 有研究团队通过分析故障过程中产生的高频信号频谱来实现距离保护; 80 年代末, 学者提出利用高频暂态量实现高压线路单端量保护; 由于暂态过程持续时间短, 信号提取困难, 暂态量保护的发展受到了制约。直到 90 年代, 计算机技术、通信技术、GPS 同步以及信号分析技术的发展, 行波研究和应用再次掀起热潮, 董新洲教授团队对行波保护及行波测距展开了研究<sup>[2]</sup>; 21 世纪初, 我国提出了基于单端暂态量故障高频信息的高压直流输电线路保护<sup>[3-5]</sup>; 随着电力电子设备的广泛应用, 基于暂态量的电力电子化电力系统保护的研究获得广泛关注。

本文介绍了新能源电源、直流输电以及 FACTS 元件等接入电网后的故障暂态特征, 分析了电网的发展给反应工频电气量的继电保护带来的挑战; 介绍了暂态量保护的发展过程, 分析了几种单端暂态量保护方法的特点及局限性; 最后总结了暂态量保护在电力电子化电力系统中的重要地位, 对其进一步研究提出了三点建议。

## 1 电网发展给工频量保护带来的影响

我国新能源装机容量已达 40 万 MW, 占国内发电总装机容量的 20% 以上; 建成(在建)特高压直流输电线路 14 条, 额定输送容量达 13 万 MW、输电线路超 3 万 km。随着大规模新能源发电接入、多回大容量直流馈入馈出、柔性直流以及 FACTS 设备的广泛应用, 电力电子装置已高度渗透至电力系统发电、输电、变电、配电及用电等各个环节, 电网电力电子化特征日益凸显<sup>[6]</sup>。在电力电子化电力系统中, 一方面电力电子化电力系统发生故障时, 容易引发直流换相失败, 从电源特性上给工频量保护带来不利影响; 另一方面, 故障过程中交流线路上的 FACTS 等设备的动态特性, 使工频短路阻抗发生变化, 给工频量保护造成较严重的影响<sup>[7-9]</sup>。

### 1.1 电力电子化电力系统故障特征

随着新能源发电与直流输电技术的广泛应用, 大量电力电子设备接入电网。电力电子器件的非线性、时变以及受控特征, 使得电力系统故障后的电气量发生明显畸变, 出现大量非周期分量; 谐波主要表现为低频分量和非整次分量, 其含量基本不随时间而衰减。尤其是系统故障易引发直流换相失败, 此时故障暂态过程更加复杂。

以图 1 的简单交直流模型为例, 分析交流系统发生故障后, 换相失败对系统故障暂态过程的影响。

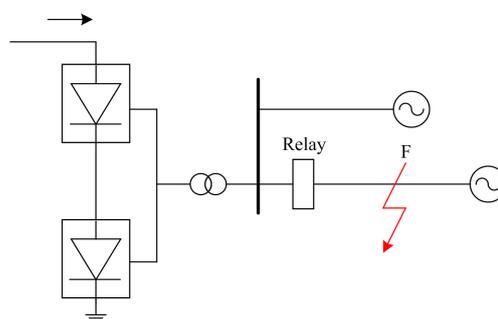


图 1 交直流混联系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AC-DC hybrid system

由于故障的位置以及严重程度不同, 分别得到不发生换相失败与发生换相失败时的故障电流, 如图 2 所示。

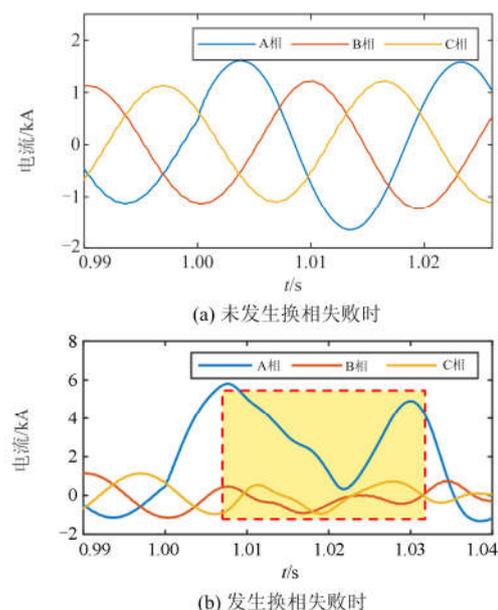


图 2 故障电流波形

Fig. 2 Fault current waveform

由图 2 可以看出, 故障未引发换相失败时, 故障电流畸变不严重, 呈现出较好的工频特征; 故障引发换相失败时, 电流波形发生严重畸变, 功率随之产生波动, 阻抗特性发生畸变, 将影响选相元件、距离元件、方向元件等的动作性能<sup>[10]</sup>。

### 1.2 电力电子器件的快速调节特性

传统电力系统中, 电网的暂态特性主要由发电机决定。系统发生故障时, 作为电源的发电机内部发生暂态过程; 以隐极机三相对称故障为例, 其短路电流全电流表达式如式(1)所示, 包含次暂态分量、暂态分量、工频分量以及非周期(直流)分量。

$$i_a = E''_{(0)} \left[ \left( \frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} + \left( \frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \frac{1}{x_d} \right] \cos(\omega t + \theta) + \frac{E''_{(0)}}{x''_d} e^{-t/T_a} \quad (1)$$

式中： $x''_d$ 、 $x'_d$  分别为次暂态电抗与暂态电抗； $T''_d$ 、 $T'_d$  分别为次暂态过程与暂态过程时间常数。同步发电机时间常数通常较大( $T''_d$  约为 0.1 s,  $T'_d$  约为 1 s)，调节速度慢，因此在时间常数内具有恒定的内电势及(次)暂态电抗值，进而可认为短路电流保持相对恒定，传统继电保护方法依然适用。

电力电子化电力系统中，换流器等器件具有快速控制、调节的功能；系统发生故障后，电源电动势与含有 UPFC 等元件的传输路径参数瞬时变化，故障工频分量具有明显的时变特征，将呈现更为复杂的暂态特性，如图 3 所示。

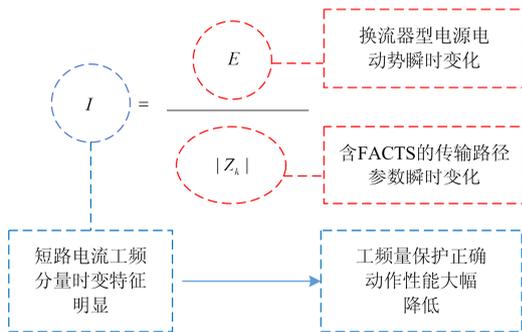
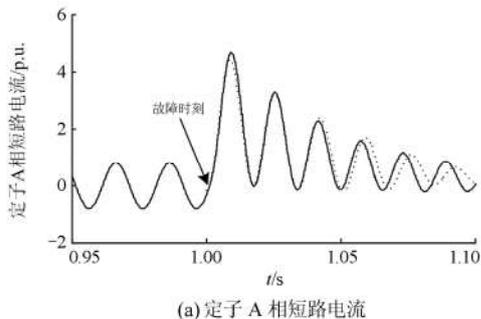


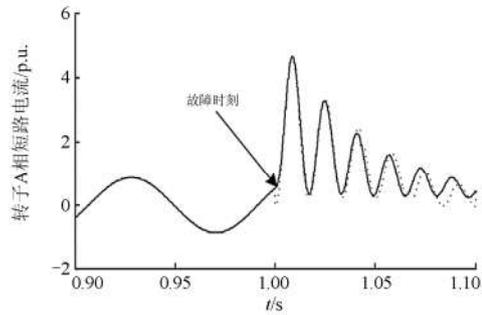
图 3 故障工频分量的时变特征

Fig. 3 Time-varying characteristics of fault power frequency

以双馈风电机组为例，其故障暂态特性与传统电机存在较大差异。故障后 DFIG 定子电流含基频分量、暂态直流分量以及衰减的转速频率分量；转子电流含强制差频分量、暂态直流分量以及衰减的转速频率分量<sup>[11]</sup>，如图 4 所示；转速频率分量的衰减时间常数小，衰减速度快，全周傅式算法在提取故障电流基频分量时会出现计算偏差，传统工频量保护无法适用。



(a) 定子 A 相短路电流



(b) 转子 A 相短路电流

图 4 DFIG 定、转子三相短路 A 相短路电流

Fig. 4 Phase A DFIG stator and rotor short-circuit current

受变流器限流环节影响，DFIG 暂态全电流呈现多区段、非线性变化特征，且并非电压跌落程度越深、故障前负荷越大，短路电流越大；受变流器限流环节的限制，DFIG 所能提供的短路电流有限，与最大负荷电流差别不大。这与同步电机的恒定内电势加次暂态或暂态阻抗的线性化模型有很大不同，给传统继电保护整定计算带来新的问题<sup>[12]</sup>。

### 1.3 电力电子设备的脆弱性

电力电子器件过载能力低、承受故障冲击能力差，表现出脆弱性：如单个交流系统的简单故障或者单个换流站的异常动态过程都可能诱发多换流站同时换相失败、直流闭锁等连锁故障的发生<sup>[13]</sup>；如系统故障期间 TCSC 元件内部电容被击穿，导致传输路径发生变化等；因此对电力电子化环境下的继电保护提出了更高的要求，需要研究能够快速、可靠动作的继电保护新方法，避免因保护动作不及时造成设备损坏或事故扩大；如柔性直流电网要求 3 ms 内切除故障，若 3 ms 内未切除故障会对设备安全构成严重威胁<sup>[14]</sup>。

综上所述，随着电网的发展，基于工频量的传统继电保护方法面临巨大挑战。故障暂态阶段中蕴含着丰富的故障特征，充分挖掘暂态信息构成暂态量保护，是解决电力电子化电力系统保护问题的有效途径。

## 2 暂态量保护的发展

由于输电线路参数分布特性、弧光故障、母线分布电容等的影响，超高压长距离输电线路故障时除含有工频信息外，还会产生包含相当宽频带的高频暂态分量(从直流分量到数百千赫兹)。这些高频暂态量中包含了诸如故障方向、位置、类型、持续时间等丰富的故障信息<sup>[15]</sup>。利用故障时产生的高频暂态量所实现的输电线路保护原理称为暂态量保护。

反映故障暂态量的保护从行波保护的研究开始, 随着超高压输电系统的发展, 系统稳定性要求保护切除故障时间更短。研究发现, 基于行波和故障暂态高频分量的单端量保护可以满足要求<sup>[16]</sup>。但单端量保护在故障识别方面具有局限性, 为了解决这一问题, 学者们进一步研究了基于双端、甚至多端暂态量的继电保护方法。

### 2.1 输电线路的故障暂态过程

输电线路发生故障时, 在时域上, 暂态电流首先呈现出初始阶跃波头, 然后是波的折反射暂态过程, 高频信号丰富。随着暂态波过程的衰减, 呈现出以集中参数形式的 RLC 振荡暂态过程, 最终衰减至故障稳态<sup>[17]</sup>。

相比集中参数, 分布参数能体现出波形的高频细节以及波的传播延迟。对比集中参数与分布参数模型下的故障暂态电流, 假设故障距离为 90 km, 波速为  $3 \times 10^8$  m/s, 则  $\Delta t = \frac{v}{2l} = \frac{3 \times 10^5 \text{ km/s}}{180 \text{ km}} = 0.6 \text{ ms}$ ,

对比结果如图 5 所示。

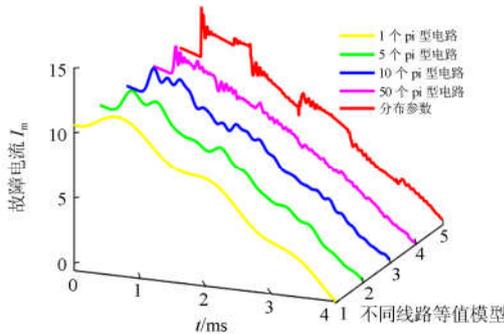


图 5 集中参数与分布参数暂态时域电流波形对比

Fig. 5 Comparison of transient current waveforms between concentrated and distributed parameters

可以看出, 随着线路参数逐渐精准化, 线路故障后暂态电流中的暂态量逐渐丰富, 并逐渐显现出暂态波特性。

### 2.2 基于暂态行波波头特征的保护

电力系统正常运行和发生故障时, 输电线路存在运动的电压和电流行波。对于继电保护, 由线路故障所产生的暂态行波, 即行波的故障分量倍受关注。根据行波的故障分量可以构成超高速动作的行波保护<sup>[18]</sup>。同基于工频电气量的传统保护相比, 行波保护具有快速动作性能。此外, 行波保护还具有不受过渡电阻、电流互感器饱和、系统振荡和长线分布电容等影响的独特优点。

输电线路的行波保护自 20 世纪 70 年代就已经

出现, 包括行波方向判别式、行波距离、行波极性判别式等保护原理<sup>[19-21]</sup>。行波保护大多是基于故障后的叠加原理, 如图 6 所示, 即认为故障后的故障附加网络是在故障点叠加一个与故障前电压大小相等方向相反的电压源, 在这个附加电源的作用下, 行波向线路两端传播<sup>[22]</sup>。

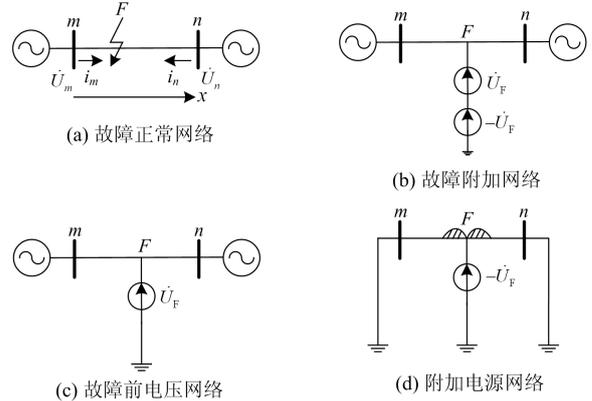


图 6 利用叠加定理分析故障产生的行波

Fig. 6 Fault traveling wave analysis using superposition theorem

借助行波波头对故障进行识别, 有以下几种常用方法:

- 1) 行波极性比较式保护: 通过比较初始行波电压和电流极性关系进行故障识别;
- 2) 行波方向保护: 根据线路两端电压、电流行波方向元件进行故障识别;
- 3) 行波幅值比较式方向保护: 根据正、反行波幅值的差异进行故障识别;
- 4) 行波故障测距与距离保护: 由初始波与反射波的时间差进行故障识别等。

西安交通大学葛耀中教授团队提出了基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理, 避免了保护受谐波影响的问题<sup>[23]</sup>; 同时提出了基于小波变换的行波幅值比较式方向保护, 验证了该原理在线路结构、故障初始角度、接地电阻等不同影响因素作用下的可行性<sup>[24]</sup>; 清华大学董新洲教授团队提出了基于暂态电流行波的输电线路故障测距方法, 验证了基于小波变换的故障测距方法的有效性<sup>[2]</sup>。

上述分析方法的局限性在于: 行波波头信号存在的时间短, 捕捉和采集的难度大, 且波头信号容易受到其他信号的干扰。

### 2.3 基于暂态信号频域特征的单端量保护

单端暂态量保护利用故障暂态分量, 反映故障的暂态过程, 因此动作时间很短, 具有超高速动作性能, 同时要求微处理器具有较高的采样速率。

基于线路边界元件(母线杂散电容、阻波器)对暂态信号的滤波特性, 区内、外故障时保护安装处

电压、电流的高低不同频段含量存在一定差异。

如图 7 所示,发生故障时,保护  $R_2$  测得暂态高频含量较低,判定为区外故障;保护  $R_1$  测得暂态高频含量较高,判断为区内故障。现有常用的分析方法有: 1) 基于小波多尺度变换及其改进方法,如小波奇异熵、小波包熵等; 2) 基于数学形态学的暂态特征识别方法; 3) 基于 S 变换构建时频特征矩阵的识别方法等。但上述方法提取的暂态特征受母线阻抗特性影响大,保护判断中高频含量“高”、“低”的门槛值很难整定。

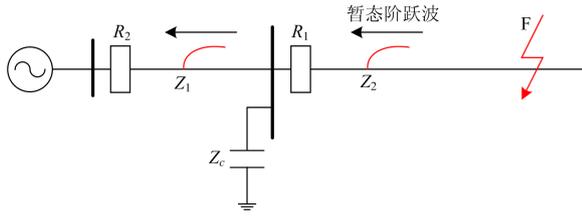


图 7 基于暂态信号频域特征的保护示意图

Fig. 7 Protection schematic diagram based on transient signal frequency domain features

### 2.4 基于多端暂态量的继电保护

基于单端暂态量的保护方法能够正确区分区内/区外故障,动作速度快;但对于不同故障类型、故障时刻等故障信息,基于单端暂态量的保护无法准确识别,需要进一步研究基于双端(多端)暂态量的保护方法。

#### 2.4.1 基于暂态电流波形特征的快速差动保护新原理

基于最小二乘算法,构造正弦拟合函数,对 5 ms 故障分量差动电流波形进行拟合,提取暂态波形主频率,仅区内故障时的故障相波形呈现出在 50 Hz 附近变化的规律,其他情况呈现出在零轴附近高频振荡的规律,方法可有效提升保护速动性。

构造拟合函数如式(2)所示。

$$F(t_i) = A \sin(2\pi f t_i + \theta) + C, A > \pi, f > 0 \quad (2)$$

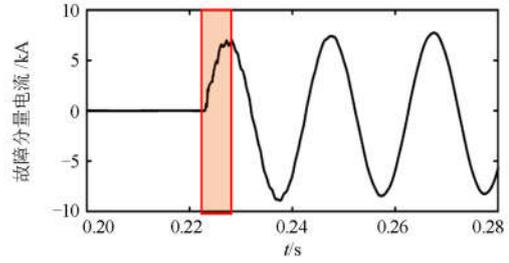
式中:  $A$ 、 $f$ 、 $\theta$ 、 $C$  分别为拟合函数的幅值、频率、相角及非周期分量。同时为了防止误拟合,设置最小拟合幅值  $\tau$ 。通过最小化采样数据与拟合数据之间误差平方和对各未知数进行求解,得

$$\min S = \sum_{i=0}^n (F(t_i) - x(t_i))^2 \quad (3)$$

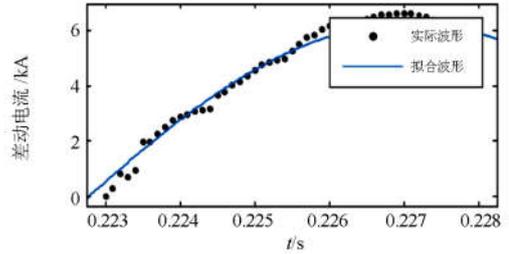
同时令

$$\Delta A^2 + 0.01 \Delta f^2 + \Delta \theta^2 + \Delta C^2 \leq \varepsilon_0 \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon_0$  为拟合精度值。恰当的初值选择可以提高计算效率。拟合结果如图 8、图 9 所示。



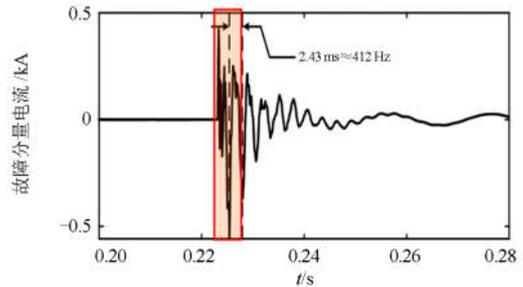
(a) 故障分量电流



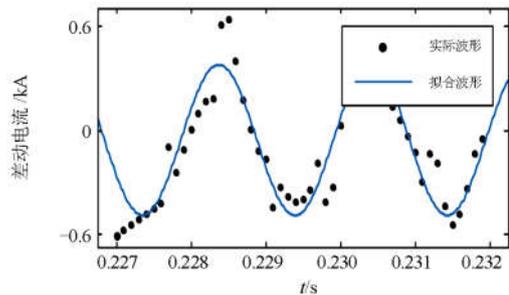
(b) 差动电流拟合

图 8 区内故障时故障相电流

Fig. 8 Fault phase current in internal fault



(a) 故障分量电流



(b) 差动电流拟合

图 9 区内故障时非故障相电流

Fig. 9 Non-fault phase current in internal fault

#### 2.4.2 基于多端暂态量比较的快速保护方法

利用小波能量熵提取母线关联出线保护处故障暂态特征,并进行横向相对值比较,可识别故障方向。基于线路两侧故障逻辑信号,能识别区内、外及母线故障,避免 UPFC 等 FACTS 元件对传统

暂态量保护的不利影响。

当母线各出线保护启动后, 各保护计算 1 ms 内小波能量熵累加和记为  $\sum W_{i,ee}$ , 并将其上传 SV 网至站域主机。站域主机选取母线各出线中的最小值为基准值, 计算各出线相对于基准值的比值  $r_i$  为

$$r_i = \frac{\sum W_{i,ee}}{\min\{\sum W_{1,ee}, \sum W_{2,ee}, \dots, \sum W_{n,ee}\}} \quad (5)$$

式中,  $r_i$  为第  $i$  条出线的比值。

若母线各出线中存在  $r_i > r_{set}$  时, 判定该线路正方向发生故障, 线路本侧保护动作开放, 并向对侧发送允许跳闸信号; 对于  $1 \leq r_i < r_{set}$  的线路, 判定为线路反方向发生故障, 闭锁本侧保护, 并向对侧发送闭锁信号。若母线各出线均判定为  $1 \leq r_i < r_{set}$ , 当保护收到对侧允许跳闸信号时, 判定为本侧母线发生故障。其中  $r_{set}$  的值根据最不利的工况进行选取, 根据仿真结果分析并考虑一定裕度, 选取  $r_{set} = 1.7$ 。

在图 10 所示的模型中进行仿真, 以  $F_1$  故障为例, 分析各保护安装处小波能量熵随时间的变化曲线, 如图 11 所示。

$F_1$  故障时, 母线故障侧与非故障侧线路的小波能量熵最小比值  $r_i$  为 2.85, 保护可有效识别故障方向。

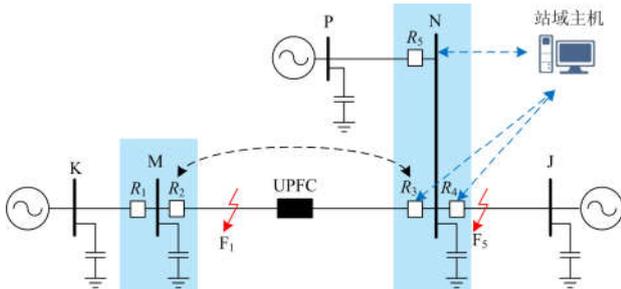
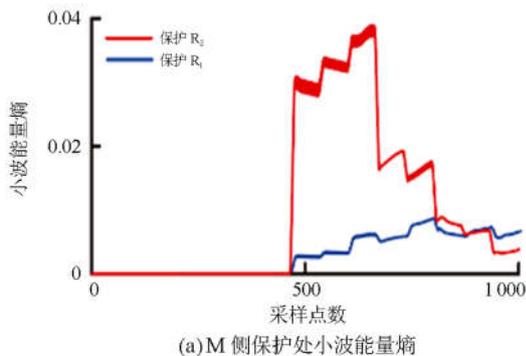
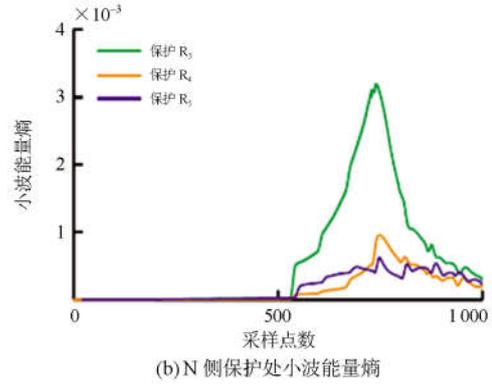


图 10 500 kV 系统仿真模型

Fig. 10 500 kV power system simulation model



(a)M 侧保护处小波能量熵



(b)N 侧保护处小波能量熵

图 11  $F_1$  单相接地短路的小波能量熵

Fig. 11 Wavelet energy entropy in  $F_1$  single phase fault

### 3 结论

基于工频量的继电保护具有优良的性能, 但是随着电力电子化电力系统的发展, 电网结构更加复杂, 系统的暂态响应呈现出更加复杂的时间尺度特性, 工频量保护难以满足快速性与可靠性的要求<sup>[25-28]</sup>。由于故障的暂态过程同样包含了大量故障信息, 通过合理利用故障全过程信息可以大幅度提升继电保护的可靠性。对暂态量继电保护研究, 有如下三个建议:

- 1) 提升暂态信号传输的可靠性。暂态量保护往往对瞬时值进行计算, 对采样率(数千赫兹至数百千赫兹)及暂态信号的准确性要求较高, 因此需研究信号传输系统对暂态量信号的影响问题。
- 2) 对实验和现场录波的研究。暂态量保护对数据准确性要求较高, 现多通过仿真进行研究, 应加强物理实验和现场录波数据进行验证, 推动暂态量保护的实用化进程。
- 3) 充分挖掘和综合利用故障全过程信息。充分利用故障蕴含的丰富暂态量信息, 融合由初始行波、暂态量、工频突变量到工频稳态的故障全过程信息, 实现电力电子化电力系统继电保护性能与故障信息的自适应匹配。

### 参考文献

[1] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 26(2): 13-18.  
WANG Zengping, JIANG Xianguo, ZHANG Zhichao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 26(2): 13-18.

[2] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4):

- 76-80.  
DONG Xinzhou, GE Yaozhong, XU Bingyin. Research of fault location based on current travelling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 76-80.
- [3] 张保会, 孔飞, 张嵩, 等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 179-185.  
ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Technical development of non-unit protection devices based on transient signals for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 179-185.
- [4] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.  
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.
- [5] 侯俊杰, 宋国兵, 常仲学, 等. 基于暂态功率的高压直流线路单端量保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 203-216.  
HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. Transient power based single-end protection for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power System, 2019, 43(21): 203-216.
- [6] 陈国平, 王德林, 裘愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11.  
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11.
- [7] ALBASRI F A, SIDHU T S, VARMA R K. Performance comparison of distance protection schemes for shunt-FACTS compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2116-2125.
- [8] 孔祥平, 袁宇波, 高磊, 等. 含 UPFC 线路的距离保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5219-5226.  
KONG Xiangping, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. Study of distance protection scheme for transmission line including UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5219-5226.
- [9] 吕哲, 王增平, 许琬昱, 等. 基于母线关联出线暂态频谱信息的 UPFC 线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 139-152.  
LÜ Zhe, WANG Zengping, XU Wanyu, et al. Pilot protection of UPFC line based on transient spectrum information of busbar-connected outgoing lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 139-152.
- [10] 索南加乐, 张健康, 焦在滨, 等. 交直流混联电网交流系统故障特征分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1461-1467.  
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, JIAO Zaibin, et al. AC fault characteristic analysis of AC-DC hybrid transmission grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1461-1467.
- [11] 范小红, 孙士云, 孙德娟, 等. 双馈风机三相短路电流特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 38-48.  
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, SUN Deyuan, et al. Analysis of three-phase short-circuit current characteristics of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 38-48.
- [12] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 考虑变流器限流与 GSC 电流的双馈风力发电机暂态全电流计算与分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4123-4135.  
WANG Zengping, LI Jing, ZHENG Tao, et al. Calculation and analysis of transient short circuit current of doubly-fed induction generator considering convertor current limitation and GSC current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4123-4135.
- [13] 董新洲, 汤涌, 卜广全, 等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3119.  
DONG Xinzhou, TANG Yong, PU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.
- [14] 徐政, 刘高任, 张哲任. 柔性直流输电网的故障保护原理研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 1-8.  
XU Zheng, LIU Gaoren, ZHANG Zheren. Research on fault protection principle of DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 1-8.
- [15] 吕延洁, 张保会, 哈恒旭. 基于暂态量超高速线路保护的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 56-61.  
LÜ Yanjie, ZHANG Baohui, HA Hengxu. Development and prospect of ultra-high speed protection for EHV transmission systems based on fault-generated transients[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 56-61.
- [16] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 基于暂态量超高压输电线路无通信保护的研究[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(4): 4-7.  
HA Hengxu, ZHANG Baohui, LÜ Zhilai. Super pressure power transmission line non-communication protection based on transient component[J]. Electric Power Automation

- Equipment, 2000, 20(4): 4-7.
- [17] 吕哲, 王增平. 基于暂态电流波形特征的快速差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1534-1545.  
LÜ Zhe, WANG Zengping. A transient current waveform feature based novel high-speed differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1534-1545.
- [18] 董新洲, 葛耀中, 贺家李, 等. 输电线路行波保护的现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 56-61.  
DONG Xinzhou, GE Yaozhong, HE Jiali, et al. Status quo and prospect of travelling waves protection of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 56-61.
- [19] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用—A 型原理[J]. 继电器, 2004, 32(2): 13-17.  
CHEN Ping, GE Yaozhong, XU Bingyin, et al. Modern travelling wave based fault location principle and its applications to actual fault analysis — type A principle[J]. Relay, 2004, 32(2): 13-17.
- [20] 董杏丽, 董新洲, 张言苍, 等. 基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 22(2): 11-15.  
DONG Xingli, DONG Xinzhou, ZHANG Yancang, et al. Directional protective relaying based on polarity comparison of travelling wave by using wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 22(2): 11-15.
- [21] 田培涛, 陈勇, 吴庆范, 等. 基于柔直电网的暂态量保护方案及配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 1-8.  
TIAN Peitao, CHEN Yong, WU Qingfan, et al. Study on transient-based protection scheme and cooperation strategy based on flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 1-8.
- [22] 于洋, 孙学锋, 高鹏, 等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154.  
YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng, et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 148-154.
- [23] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲, 等. 基于小波变换的行波幅值比较式方向保护[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 11-16.  
DONG Xingli, GE Yaozhong, DONG Xinzhou, et al. Directional protective relaying based on amplitude comparison of traveling wave using wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 11-16.
- [24] Power System Dynamic Performance Committee. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies[R]. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020.
- [25] 王增平, 杨国生, 汤涌, 等. 基于特征影响因子和改进 BP 算法的直驱风机风电场建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2604-2614.  
WANG Zengping, YANG Guosheng, TANG Yong, et al. Modeling method of direct-driven wind generators wind farm based on feature influence factors and improved BP algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2604-2614.
- [26] 任必兴, 杜文娟, 王海风, 等. UPFC 接入对江苏特高压交直流混联电网的动态交互影响研究[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2654-2661.  
REN Bixing, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Dynamic interaction investigation on a UPFC connecting to Jiangsu UHV AC/DC hybrid power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2654-2661.
- [27] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [28] 林湘宁, 刘琦, 范理想, 等. 基于相关分析的多端直流电网线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 45-55.  
LIN Xiangning, LIU Qi, FAN Lixiang, et al. A novel pilot protection for VSC-MTDC based on correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 45-55.

收稿日期: 2020-10-10

作者简介:

郑博文(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: zhengbowen0713@163.com

王增平(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化、继电保护。E-mail: wangzp1103@sina.com

(编辑 张爱琴)