

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200196

基于超导故障限流器的多级馈线电流保护新方案

陈艳霞¹, 吕立平¹, 李振兴², 及洪泉¹, 万勇²

(1. 国网北京电力科学研究院, 北京 100075; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 随着配网规模的快速发展, 配电网线路呈现线路短、节点多的情形, 进而导致短路电流差异较小, 传统电流保护方案配合困难以及故障切除时间延长。为解决上述问题, 首先梳理多级馈线保护存在的问题, 对多级馈线长短混联线路保护配置与整定方案进行分析, 进而提出了一种基于超导故障限流器的电流保护新方案。该保护方案利用故障限流器的快速投入与限流特性实现上下游线路短路电流差异化。基于此, 构建新的保护定值整定原则, 缩短故障切除时间。利用 PSCAD 搭建多级馈线配电网模型进行仿真验证。结果表明: 所提保护方案能够解决传统电流保护定值配合失效与保护动作时间过长等问题。

关键词: 中低压配电网; 电流保护; 超导故障限流器; 多级馈线; 定值整定

A new current protection scheme based on a superconducting fault current limiter for a multi-stage feeder

CHEN Yanxia¹, LÜ Liping¹, LI Zhenxing², JI Hongquan¹, WAN Yong²

(1. State Grid Beijing Electric Power Research, Beijing 100075, China;

2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: With the rapid development of the distribution network, the network lines show situations of short lines and many nodes. This results in a small difference of the short-circuit current, difficult cooperation of conventional current protection schemes and prolonged fault clearing time. In order to solve the above problems, first, the existing problems of multi-stage feeder protection are analyzed, and the protection configuration and setting scheme of length and short-length hybrid lines are analyzed. A new current protection scheme based on a superconducting fault current limiter for a multi-stage feeder is proposed. The protection scheme uses the fast input of a fault current limiter and current limiting characteristics to realize the differentiation of short circuit current between upstream and downstream lines. Thereby, new principles of protection setting and operation time coordination are constructed to shorten the fault clearing time. A multi-stage feeder distribution network model based on the PSCAD/EMTDC for simulation verification is built. The results show that the proposed protection scheme can solve the problems of conventional current protection setting value coordination failure and long protection action delay.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52077120) and Science and Technology Project of State Grid Beijing Electric Power Company (No. 520223180016) "Study on Principles and Setting Regulations of Multi-stage Feeder Small Step Difference Cooperative Protection Considering the Intrinsic Characteristics of Circuit Breakers".

Key words: middle and low-voltage distribution system; current protection; superconducting fault current limiter (SFCL); multi-stage feeder; setting calculation

0 引言

随着电力系统的快速发展和城市规模的不断扩

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077120); 国网北京市电力公司项目资助(520223180016)“考虑断路器固有特性的多级馈线小级差配合保护原理与整定规范研究”

大, 为了满足不同区域性用电、重要用户用电、新能源发电接入等需求, 配电网的结构越来越复杂, 呈现多类型辐射状, 如长线路、多级短线路、混合架空与电缆线路、交直混联等。多级串联配电网是城市配电网发展主流, 对于多级短线路而言, 传统三段式电流保护方案已很难满足继电保护的基本要求, 导致故障切除时间延长、停电范围扩大以及

越级跳闸等问题的出现^[1-4]。为了提高保护系统的可靠性,近年来人们对传统保护方案进行改进,文献[5]利用速断保护、定时限电流保护和反时限电流保护相互配合大大缩短了故障切除时间。文献[6]借助于方向元件与过电流元件构建了新的配电网保护方案,通过保护之间的时间配合关系来提高保护的选择性,但导致故障切除时间延长。文献[7-8]利用反时限过电流保护进行逐级配合提高保护方案的选择性,但保护定值整定配合非常复杂,导致整体动作时间延长。文献[9]提出了一种新的方向过电流保护配合方案,利用进化算法与线性规划方法来缩短保护的配合时间。但由于配电网输电线路距离较短,导致上下级线路保护之间定值整定与配合困难。

计算机技术和通信技术的发展为解决配电网保护配合失效问题提供了新的解决思路^[10-13],文献[14-17]借助于通信通道传输实时信息构建自适应保护方案,根据电力系统的实时运行状态,在线自动计算与修改整定值,扩大保护范围。文献[18-22]提出了多种广域电流保护方案,利用广域信息构建保护动作判据,提高保护的选择性和灵敏性。文献[23-25]借助于通信通道实现线路两侧故障信息的实时交换,基于线路两侧的故障信息构建差动保护方案,从而能够很好地解决传统保护方案定值配合失效等问题。但由于架设通信通道的成本较高,应用于中低压配电网时经济性较低,并且当通信系统发生故障时^[26],可能导致保护误动或拒动。

本文研究主要针对于含多级馈线的中低压配电网,首先分析电流保护方案目前存在的问题,再通过安装电阻型超导故障限流器来实现故障限流器上游线路与下游线路短路电流差异化,最终提出新的保护定值整定与动作时间配合原则,形成新的保护方案。该保护方案具有良好的动作特性,能够有效解决电流保护定值配合失效与保护动作时间过长问题。

1 配电网多级馈线保护问题分析

电流保护由于其原理简单、投资小,在配电网线路中得到广泛应用。电流保护 I 段的动作电流 $I_{set,i}^I$ 按照最大系统运行方式下各级线路末端三相短路电流进行整定,其保护灵敏度按照最小运行方式两相短路时保护范围不低于 15%~20% 进行校验。但随着城市配电网快速发展,线路越来越短,线路阻抗越来越小,线路级数越来越多,从而导致线路发生短路故障时,各级线路故障电流接近,传统电流保护难以整定。

如图 1 所示,由于线路阻抗小,沿线路短路电

流差别不大,短路电流曲线平滑。按照传统电流保护整定原则, $I_{set,3}^I$ 为末端线路电流保护 I 段整定值,其值已经大于本线路始端的最大短路电流,此时电流保护 I 段失去保护范围。

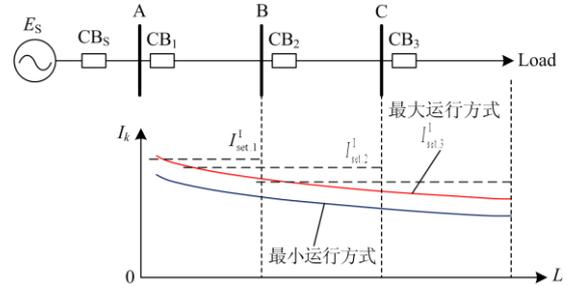


图 1 短线路故障电流分布

Fig. 1 Fault current distribution of short lines

由上述分析可知,对于短线路而言电流保护 I 段可能失去保护范围,此时只能依靠电流保护 II 段动作将故障切除。如图 2 所示,由于短线路电流保护 I 段失去保护范围,故每一级电流保护 II 段只能与下一级线路电流保护 II 段相配合,每一级保护的配合时间比相邻下一级保护的配合时间高出一个 Δt , 形成 II 段保护阶梯延时配合关系。

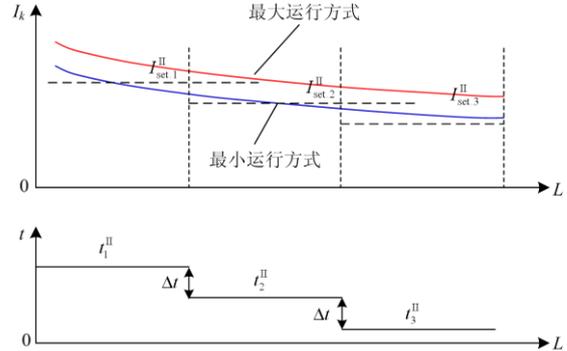


图 2 短线路电流保护 II 段定值与动作时限配合

Fig. 2 Setting value of current protection section II and coordination of operation time in short lines

由图 2 可知,即使通过电流保护 II 段时间相互配合能够实现选择性,但按照传统电流保护整定原则,电流保护 II 段定值与下一级电流保护 II 段配合,即 $I_{set,1}^{II} = K_{rel}^{II} I_{set,2}^{II}$,可能会导致 $I_{set,1}^{II}$ 较大,使得在最小运行方式下线路末端短路时保护的灵敏度难以满足要求,即电流保护 II 段无法保护本线路的全长,电流保护 II 段定值配合失效。同时保护 1 电流保护 II 段动作时间 $t_1^{II} = 2\Delta t$, Δt 一般取 0.3~0.5 s。随着馈线级数的增加,保护 1 动作时间将会更长,当电源始端线路或者变压器低压侧出口故障时,故障切除时间较长,对系统的安全运行影响较大。

2 多级馈线电流保护新方案

2.1 多级馈线长短混联线路保护配置与整定

如果配网出现长线路会改变图 2 所示的保护配合关系。与高压输电网络中的长线路不同，配网系统中的长线路指该线路的电流保护 I 段按照传统整定原则存在保护范围。

如图 3 所示，BC 线路较长，按照传统电流保护整定，保护 I 段具有保护范围，而其他线路如第 1 节分析，均为短线路。此时，保护 3 位于末端线路，直接配置保护 II 段，定值按全范围整定；保护 2 配置电流保护 I 段、II 段，I 段定值按传统电流保护 I 段整定，II 段定值按全范围保护整定；保护 1 配置 II 段，定值与 BC 线路 I 段保护配合整定，如果全线保护灵敏度不满足要求，则与 BC 线路保护 II 段配合，按全范围保护整定。

所谓全范围整定，即在系统任意运行方式下，保护 II 段均能够保护本线路全长，且灵敏度满足要求，计算公式如式(1)所示。

$$I_{set}^{II} = \frac{\sqrt{3} K'_{rel} E_{\phi}}{2 Z'_{s,max} + Z_L} \quad (1)$$

式中： $Z'_{s,max}$ 为整定线路背侧系统最小运行方式等值阻抗； Z_L 为整定线路阻抗； K'_{rel} 为全范围保护整定可靠系数，根据满足灵敏度要求，一般取 0.75~0.80。按照式(1)进行整定，保护满足灵敏度要求，无需进行校验。

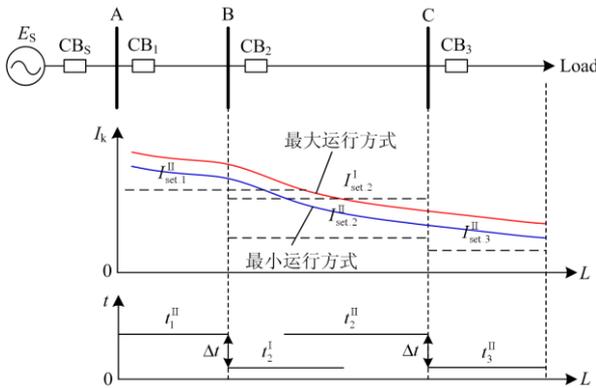


图 3 多级长短馈线混联线路保护配置

Fig. 3 Protection configuration of multi-stage long and short feeder hybrid lines

保护动作时间分析，保护 3 为末端线路，其 II 段如果不需要与负荷设备快速段保护配合，可设置为瞬时段，延时 $t_3^{II} = 0\text{ s}$ ；保护 2 配置了两段保护， $t_2^I = 0\text{ s}$ ， $t_2^{II} = t_3^{II} + \Delta t$ ；保护 1 配置电流保护 II 段， $t_1^{II} = t_2^I + \Delta t$ ，如果灵敏度不满足要求， $t_1^{II} = t_2^{II} + \Delta t$ 。

由图 3 可以看出，长线路的存在能够使动作时间的阶梯配合解链，该线路上下游线路电流保护 II 段间不存在动作时间配合关系；上游或下游如果均为短线路，则各自配合，而且长线路分布位置不同，直接影响长线路上下游线路保护定值与动作时间的配合关系。

2.2 基于超导故障限流器的电流保护方案

针对多级连续短线路，根据第 1 节分析可知，电流保护 II 段呈阶梯时间配合，延时较长。事实上，定值配合失效是线路阻抗小导致的。短路电流过于平滑，上下游线路电流保护无法通过定值配合实现选择性。当线路阻抗增大时则可以解决定值配合失效问题。借助于这个思想，针对短线路，引入电阻型超导故障限流器(Resistive-type Superconducting Current Limiter, RSFCL)。相当于在故障发生时刻瞬时串入高阻，降低故障电流的大小，同时改变了上下游线路故障电流的差异，使之能够通过定值配合实现选择性，进而解链阶梯延时配合关系，降低保护延时。

如图 4 所示，为缩短近电源侧故障切除时间，考虑在线路 BC 首端装设电阻型超导故障限流器。由于限流器的作用，BC 线路及下游线路发生故障时，启动故障限流器，降低短路电流大小；而 AB 线路故障时，线路短路电流较大，因此 AB 线路区内、区外故障短路电流存在较大差异，保护 1 直接配置电流保护 II 段，定值按全范围保护整定，但要考虑故障限流器末端短路的配合问题。而对于保护 2、保护 3 而言，仍为连续短线路，各自配置保护

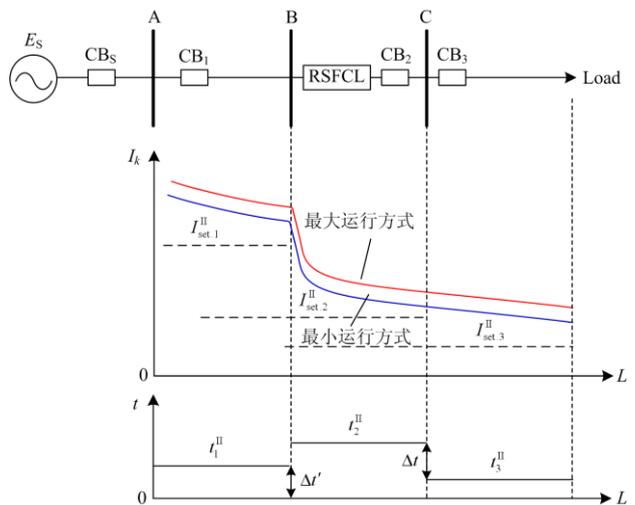


图 4 基于故障限流器的短路电流与保护整定

Fig. 4 Fault current and protection setting based on fault current limiter

II 段, 按全范围保护整定, 且需通过时间配合来保证保护的选择性。

2.3 保护整定值计算原则

1) 限流器上游线路保护整定原则

为保证保护 1 的选择性, 保护 1 的定值 $I_{\text{set.1}}^{\text{II}}$ 按躲过故障限流器出口侧最大短路电流整定, 计算公式为

$$I_{\text{set.1}}^{\text{II}} = \frac{K_{\text{rel}}^{\text{II}} E_{\varphi}}{Z_{\text{s.min}} + Z_{\text{AB}} + R_{\text{m}}} \quad (2)$$

式中: R_{m} 为限流器 RSFCL 处于高阻状态时的电阻值; Z_{AB} 为线路 AB 的等值阻抗; $Z_{\text{s.min}}$ 为系统最大运行方式等值阻抗; $K_{\text{rel}}^{\text{II}}$ 为传统电流保护 II 段可靠系数, 一般取 1.2~1.3。

为保证保护 1 能够保护线路 AB 段的全长, 所选取的整定值 $I_{\text{set.1}}^{\text{II}}$ 应在系统最小运行方式下, 线路 AB 段末端发生两相短路时具有足够的灵敏度, 即

$$K_{\text{sen.B}} = \frac{\sqrt{3} E_{\varphi}}{2 Z_{\text{s.max}} + Z_{\text{AB}}} / I_{\text{set.1}}^{\text{II}} = \frac{\sqrt{3} E_{\varphi}}{2 Z_{\text{s.max}} + Z_{\text{AB}}} / \frac{K_{\text{rel}}^{\text{II}} E_{\varphi}}{Z_{\text{s.min}} + Z_{\text{AB}} + R_{\text{m}}} = \frac{\sqrt{3} Z_{\text{s.min}} + Z_{\text{AB}} + R_{\text{m}}}{2 K_{\text{rel}}^{\text{II}} (Z_{\text{s.max}} + Z_{\text{AB}})} \geq 1.3 \quad (3)$$

式中, $Z_{\text{s.max}}$ 为系统最小运行方式下的等值阻抗。如果灵敏度不满足要求, 则增大限流器 RSFCL 电阻值 R_{m} 直到满足灵敏度要求。

由于限流器上游线路保护可以通过定值整定实现选择性, 其动作时间按瞬时动作保护整定即可; 但考虑到限流器从超导态转变到高阻态存在着固有响应时间, 为了防止保护在此时间内误动, 保护动作时间 $t_1^{\text{II}} = t_{\text{RSFCL}} + \Delta t'$ 。这里 t_{RSFCL} 为限流器固有动作时间(这个时间很短, 一般为毫秒级), $\Delta t'$ 为时间裕度, 一般取 0.12 s。

2) 限流器线路及下游线路保护整定原则

由于输电线路阻抗较小, 限流器出口侧与末端短路电流差异不大, 根据前文分析, 均配置 II 段保护, 按全范围保护整定。保护定值计算如式(1)所示, 区别在于考虑整定线路背侧系统最小运行方式等值阻抗 $Z'_{\text{s.max}}$ 时, 不能忽略限流器 RSFCL 电阻值 R_{m} 。

另外, 为了防止故障限流器的阻抗值过大, 导致保护装置无法区分故障电流与正常运行状态下的负荷电流, 因此要求末端线路保护定值必须大于正常运行状态下的最大负荷电流(考虑电动机自启动过程保护可靠返回), 即

$$I_{\text{set.3}}^{\text{II}} = \frac{\sqrt{3} K_{\text{rel}}' E_{\varphi}}{2 Z'_{\text{s.Cmax}} + Z_{\text{C}} + R_{\text{m}}} > \frac{k_{\text{ss}} I_{\text{L.max}}}{k_{\text{re}}} \quad (4)$$

式中: $Z'_{\text{s.Cmax}} = Z_{\text{s.max}} + Z_{\text{AB}} + Z_{\text{BC}}$ 为末端线路背侧系统最小运行方式等值阻抗; Z_{C} 为末端线路的等值阻抗; $I_{\text{L.max}}$ 为最大负荷电流; k_{ss} 为自启动系数; k_{re} 为返回系数。

根据式(3)、式(4)可以得到故障限流器 R_{m} 的取值范围为

$$\begin{cases} R_{\text{m}} > \frac{2.6}{\sqrt{3}} K_{\text{rel}}^{\text{II}} (Z_{\text{s.max}} + Z_{\text{AB}}) - Z_{\text{s.min}} - Z_{\text{AB}} \\ R_{\text{m}} < \frac{\sqrt{3} k_{\text{re}} K_{\text{rel}}' E_{\varphi}}{2 k_{\text{ss}} I_{\text{L.max}}} - Z'_{\text{s.Cmax}} - Z_{\text{C}} \end{cases} \quad (5)$$

限流器线路及下游线路保护动作时间同图 4 所示阶梯时延关系。

综上所述, 对于三级线路, 在串入一个限流器后, 通过保护定值的配合与动作时间的配合, 能够保证全线故障在一个 Δt 内切除, 解决了传统保护方案定值配合失效、近电源侧故障切除时间过长等问题。对于更多级线路, 如果存在时间限制要求, 可能需要串入多个限流器, 其基本整定原则同上。

3 故障限流器阻抗特性

RSFCL 是利用超导材料的失超特性将故障电流降低到一定的水平。RSFCL 的阻抗基于超导材料的非线性 $U-I$ 特性, 即 $U \sim (I/I_c)^n$, 如图 5(a)所示, I_c 为超导体的临界电流, 对于典型高温超导体, 指数 n 一般在 5~50, 与材料类型及导体性能有关^[27]。

由图 5(a)可知, 当线路正常工作时, 负荷电流较小, 流过 RSFCL 的电流小于 I_c , 此时 RSFCL 两端电压为零, 也即电阻为零。当线路发生短路故障时, 流过 RSFCL 的电流增大, RSFCL 两端的电压与流过 RSFCL 的电流呈 $U \sim (I/I_c)^n$ 特性上升。当电流超过临界电流 I_c 时, 超导材料的电阻上升几个数量级, 直至超导材料完全失超, 之后呈现出与普通电阻一样的 $U-I$ 特性。在电压升高期间, 会产生大量的热量导致超导体的温度在几毫秒内迅速超过临界温度, 从而使超导体更快达到失超状态。

如图 5(b)所示, RSFCL 的阻抗特性可以用时变电阻来进行表示^[28-29], 其不同时刻电阻值如式(6)所示。当 $t < t_0$ 时, 流过 RSFCL 的电流小于 I_c , 其阻抗大小几乎为 0; 在 t_0 时刻系统发生短路故障, 流过超导体的电流大于 I_c , 超导材料在几毫秒内失超, 故障限流器电阻迅速增大; 在 t_t 时刻故障被切除, 流过故障限流器的电流小于 I_c , 温度降低到临

界温度以下，超导体开始从失超状态恢复到超导状态，电阻逐渐降低到 0。

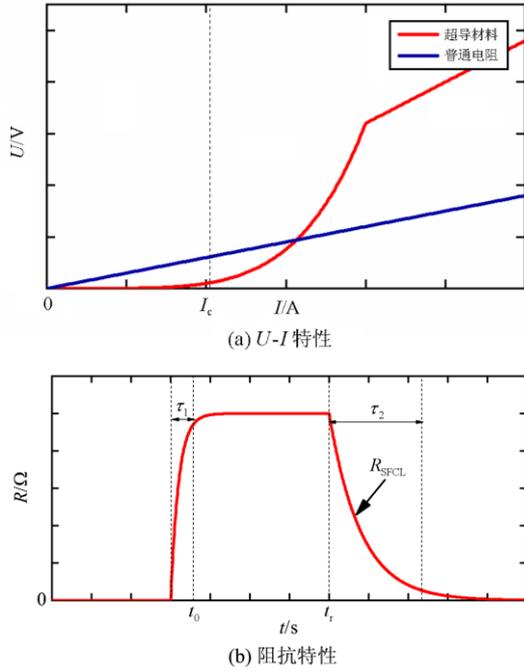


图 5 超导故障限流器动作特性

Fig. 5 Operating characteristics of superconducting fault current limiter

$$R_S(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_0) \\ R_m(1 - e^{-(t-t_0)/\tau_1}) & (t_0 < t < t_r) \\ R_m e^{-(t-t_r)/\tau_2} & (t > t_r) \end{cases} \quad (6)$$

式中： R_m 为 RSFCL 处于失超状态下的最大电阻； τ_1 为 RSFCL 失超过程中的时间常数，一般为 1 ms； τ_2 为 RSFCL 恢复过程中的时间常数，一般为 50 ms。

4 仿真分析

为验证本文提出的保护方案，采用图 6 所示的 10 kV 配电网作为仿真系统，在 PSCAD/EMTDC 中搭建多级馈线段配电网系统模型进行仿真验证。系统最大运行方式与最小运行方式下的等效阻抗分别为 $Z_{s,\min} = 0.22 + j2.5 \Omega$ 与 $Z_{s,\max} = 0.32 + j3.0 \Omega$ 。线路 AB、BC、CD 长度分别为 3 km、4 km、5 km，单位长度线路阻抗 $z_1 = 0.138 + j0.347 \Omega/\text{km}$ 。故障限流器模型参数为 $R_m = 4.0 \Omega$ ， $\tau_1 = 1 \text{ ms}$ 。计算得到保护 R1、R2、R3 的整定参数如表 1 所示。

4.1 故障限流器限流特性

图 7(a)所示为故障限流器安装前与安装后最大短路电流与最小短路电流曲线对比， I_{\max} 、 I_{\min} 分别为故障限流器安装前后的最大短路电流。 I_{\min}

分别为故障限流器安装前后的最小短路电流。图 7(b)所示为故障限流器出口侧在 0.2 s 时发生三相短路故障电流对比图， I_k 、 I_{kr} 分别为故障限流器安装前后短路电流波形。由图 7 可知故障限流器的接入能有效地限制短路电流大小，基于此实现故障限流器上下游保护定值配合，提高保护方案选择性。

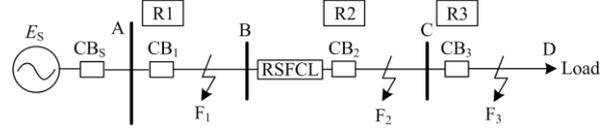


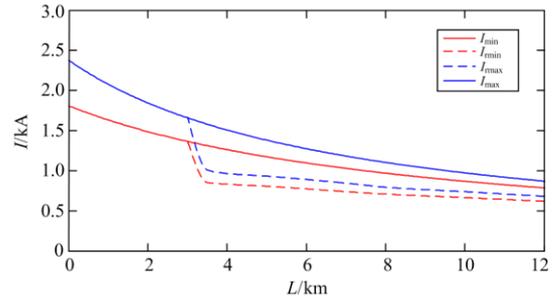
图 6 10 kV 单侧电源配电系统模型

Fig. 6 Model of 10 kV mono-source distribution network

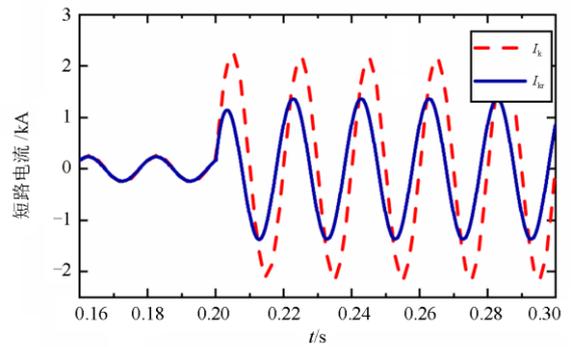
表 1 整定参数

Table 1 Setting parameters

保护位置	整定值/kA	动作时限/s
R1	1.246	0.12
R2	0.554	0.30
R3	0.450	0.00



(a) 短路电流



(b) F_2 点故障短路电流波形

图 7 故障限流器阻抗特性仿真

Fig. 7 Simulation of impedance characteristics of fault current limiter

4.2 线路 AB 故障保护验证

在系统最大运行方式下，线路 AB 上故障点 F_1 在 0.2 s 时刻发生三相短路。如图 8 所示，流过保护 R1 安装处的电流由负荷电流 0.246 kA 上升到

1.685 kA, RSFCL 保持超导状态。保护 R1 经过 0.12 s 延时动作将故障切除, 而保护 R2 与保护 R3 不动作。在系统最小运行方式下, 故障点 F_1 在 0.2 s 时刻发生 AB 相间短路。如图 9 所示, 电流由负荷电流

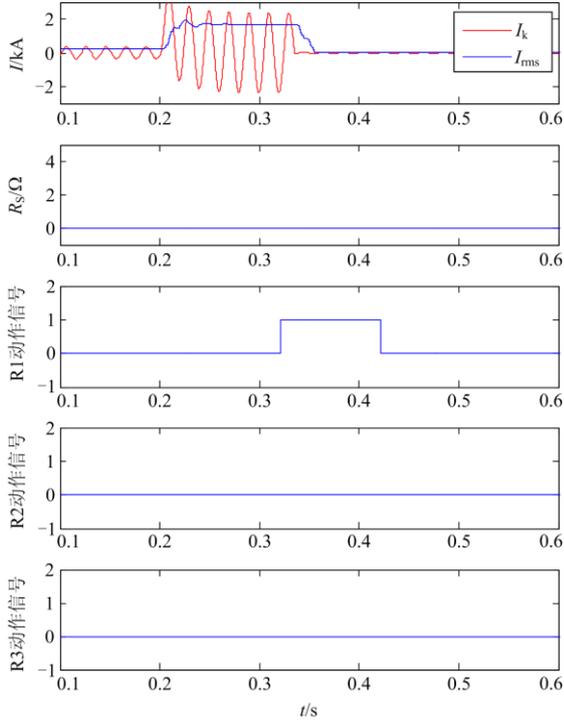


图 8 F_1 点三相短路保护动作情况

Fig. 8 Operating response of protection for a A-B-C-g fault at F_1

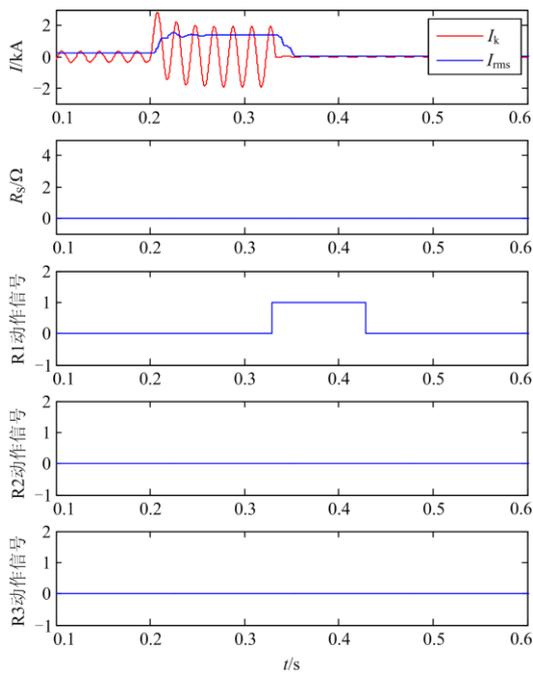


图 9 F_1 点 AB 相间短路保护动作情况

Fig. 9 Operating response of protection for a A-B fault at F_1

0.246 kA 上升到 1.378 kA, RSFCL 保持超导状态, 保护 R1 经过 0.12 s 延时动作将故障切除, 而保护 R2 与保护 R3 不动作。

距母线 A 分别为线路 AB 全长的 20%、40%、60%、80% 处, 在系统最大运行方式下 0.2 s 时刻发生短路故障, 保护 R1 的动作情况如表 2 所示。由表 2 可知, 当线路 AB 发生故障时, 保护 R1 能可靠动作, 在 0.331 s 时刻左右将故障切除。

表 2 线路 AB 故障保护动作情况

Table 2 Operating response of protection for faults at Line AB

故障位置	故障类型	短路电流/kA	动作时刻
20%	AB	1.936	0.330
	ABCg	2.171	0.330
40%	AB	1.755	0.330
	ABCg	1.95	0.331
60%	AB	1.608	0.331
	ABCg	1.783	0.331
80%	AB	1.48	0.333
	ABCg	1.64	0.332

4.3 线路 BC 故障保护验证

在系统最大运行方式下, 线路 BC 上的故障点 F_2 在 0.2 s 时刻发生三相短路。如图 10 所示, 流过保护 R2 安装处的电流由负荷电流 0.246 kA 上升到 1.036 kA, RSFCL 迅速由超导状态转化为高阻态限制短路电流大小, 保护 R1 与保护 R3 此时不动作, 保护 R2 经过 0.3 s 延时动作将故障切除。在系统最小运行方式下, 故障点 F_2 在 0.2 s 时刻发生 AB 相

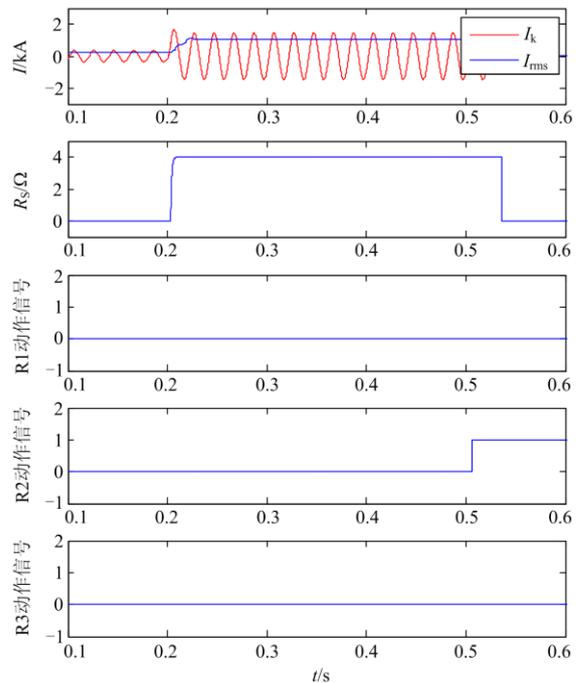


图 10 F_2 点三相短路故障保护动作情况

Fig. 10 Operating response of protection for a A-B-C-g fault at F_2

间短路。如图 11 所示，电流由负荷电流 0.246 kA 上升到 0.897 kA，RSFCL 迅速由超导状态转化为高阻态限制短路电流大小，保护 R1 与保护 R3 此时不动作，保护 R2 经过 0.3 s 延时动作将故障切除。

距母线 B 分别为线路 BC 全长的 20%、40%、60%、80% 处，在系统最大运行方式下 0.2 s 时刻发生短路故障，得到保护 R2 的动作情况如表 3 所示。由表 3 可知，当线路 BC 发生故障时，保护 R2 能可靠动作，在 0.516 s 时刻左右将故障切除。

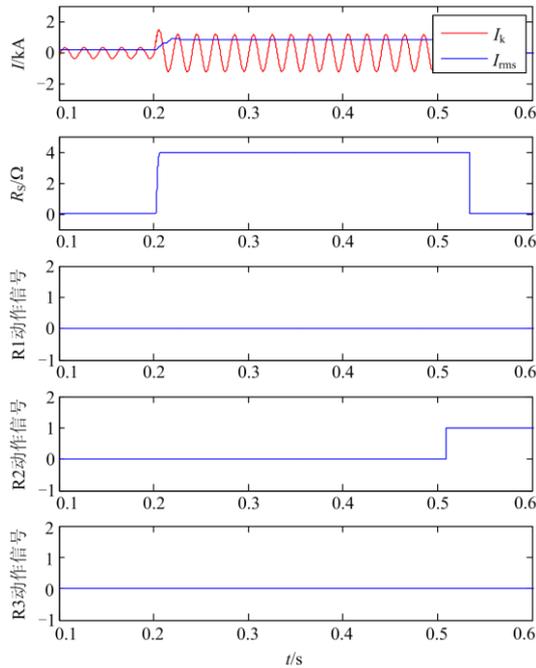


图 11 F₂ 点 AB 相间短路保护动作情况

Fig. 11 Operating response of protection for a A-B fault at F₂

表 3 线路 BC 故障保护动作情况

Table 3 Operating response of protection for faults at Line BC

故障位置	故障类型	短路电流/kA	动作时刻
20%	AB	0.780	0.516
	ABC _g	0.890	0.516
40%	AB	0.744	0.516
	ABC _g	0.848	0.516
60%	AB	0.71	0.517
	ABC _g	0.810	0.517
80%	AB	0.680	0.517
	ABC _g	0.77	0.517

4.4 末端线路故障保护验证

在系统最大运行方式下，故障点 F₃ 在 0.2 s 时刻发生三相短路。如图 12 所示，流过保护 R3 安装处的电流由负荷电流 0.246 kA 上升到 0.814 kA，RSFCL 迅速由超导状态转化为高阻态限制短路电流大小，保护 R1 与保护 R2 此时不动作，保护 R3 瞬

时动作将故障切除。在系统最小运行方式下，故障点 F₃ 在 0.2 s 时刻发生 AB 相间短路。如图 13 所示，电流由负荷电流 0.246 kA 上升到 0.768 kA，RSFCL 迅速由超导状态转化为高阻态限制短路电流大小，保护 R1 与保护 R2 不动作，保护 R3 瞬时动作将故障切除。

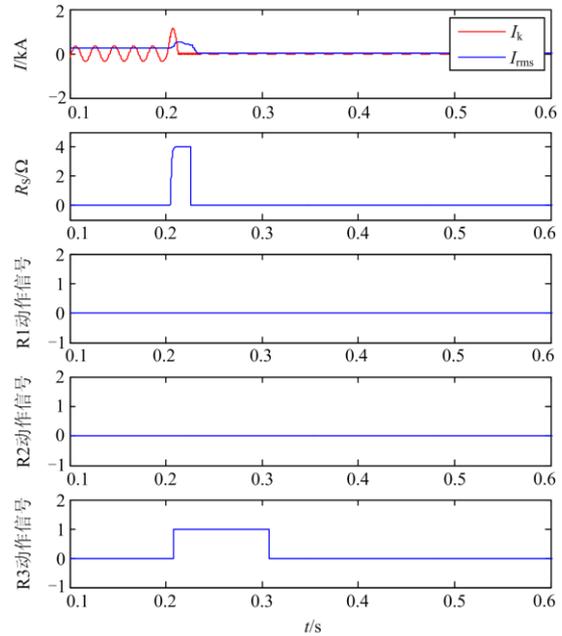


图 12 F₃ 点三相短路保护动作情况

Fig. 12 Operating response of protection for a A-B-C-g fault at F₃

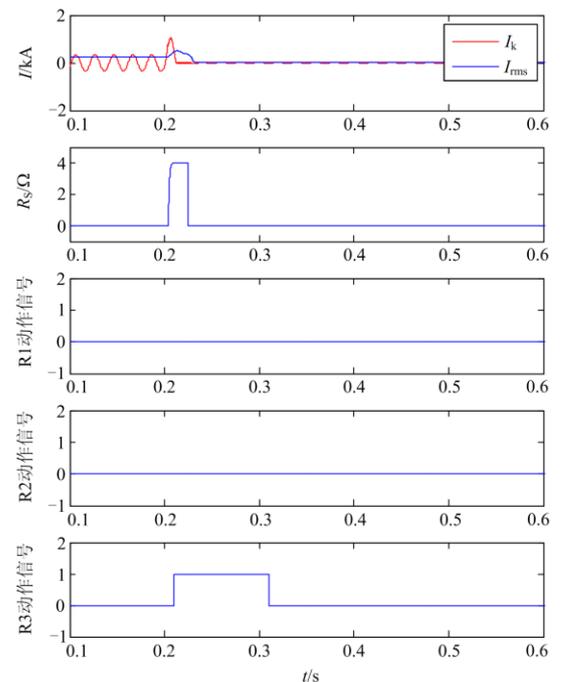


图 13 F₃ 点 AB 相间短路保护动作情况

Fig. 13 Operating response of protection for a A-B fault at F₃

5 结论

本文基于超导限流器的限流特性, 提出了一种多级馈线电流保护方案。经过理论分析与仿真验证, 能够得到如下结论:

1) 利用故障限流器能够实现故障限流器上下游线路短路电流差异化, 通过定值配合提高故障限流器上游保护的选择性;

2) 提出新的定值整定与动作时间配合原则, 缩短了近电源侧故障切除时间;

3) 仿真结果证明该保护方案能够解决电流保护在配电网线路中存在的定值配合失效与近电源侧故障切除时间较长的问题。

参考文献

- [1] 戴志辉, 王增平, 焦彦军, 等. 阶段式保护原理性失效风险的概率评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 175-182.
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun, et al. Probabilistic assessment method for failure risk of stepped protection philosophy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 175-182.
- [2] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [3] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电网故障处理若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Investigation on fault processing for electric power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-6.
- [4] 王文彬, 伍小生, 朱傲, 等. 基于层次分析法的配电网“低电压”智能规划与综合治理评估技术研究及应用[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 2): 596-607.
WANG Wenbin, WU Xiaosheng, ZHU Ao, et al. Research and application of low-voltage intelligent planning and comprehensive treatment evaluation technology for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 596-607.
- [5] 牛耕, 周龙, 裴玮, 等. 低压有源配电网在线故障区间定位与识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2525-2539.
NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. On-line fault section location and classification technique for low voltage active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2525-2539.
- [6] ZEINELDIN H H, SHARAF H M, IBRAHIM D K, et al. Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over-current relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6(1): 115-123.
- [7] CHUNG J L, LU Y, KAO W S, et al. Study of solving the coordination curve intersection of inverse-time overcurrent relays in subtransmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1780-1788.
- [8] 袁荣湘, 陈彧, 吴昊. 采用 PSO 算法的反时限过流保护配合方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1730-1735.
YUAN Rongxiang, CHEN Yu, WU Hao. Method of inverse-time overcurrent protection coordination using PSO algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1730-1735.
- [9] SUEIRO J A, DIAZDORADO E, MIGUEZ E, et al. Coordination of directional overcurrent relay using evolutionary algorithm and linear programming[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 299-305.
- [10] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 基于拓扑图元信息融合的电网故障诊断模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 512-522.
XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Power grid fault diagnosis model based on information fusion of topological graph element[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 512-522.
- [11] 周静, 孙媛媛, 胡紫巍, 等. 智能电网信息通信架构演进探讨[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 131-135.
ZHOU Jing, SUN Yuanyuan, HU Ziwei, et al. Discussion on smart grid information & communication architecture evolution[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 131-135.
- [12] 刘尧, 金能, 邢家维, 等. 基于割电流的配电网选择性快速辅助保护方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4888-4900.
LIU Yao, JIN Neng, XING Jiawei, et al. Selective fast supplementary protection method of distribution network based on cutset current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4888-4900.
- [13] 李振兴, 吴李群, 谭洪, 等. 基于简单通信的双端行波测距新方法[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 74-79.
LI Zhenxing, WU Liqun, TAN Hong, et al. A novel method for double terminal traveling wave fault location based on simple communication[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 74-79.
- [14] LIN Hengwei, SUN Kai, TAN Zhenghua, et al. Adaptive protection combined with machine learning for microgrids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(6): 770-779.

- [15] MAHAT P, CHEN Z, BAK-JENSEN B, et al. A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 428-437.
- [16] 陈实, 邵能灵, 范春菊, 等. 考虑风力发电的配电网馈线线路自适应电流保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 65-73.
CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. An adaptive current protection for weak-infeed distribution lines with wind generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 65-73.
- [17] 朱永利, 宋少群. 基于广域网和多智能体的自适应协调保护系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 15-20.
ZHU Yongli, SONG Shaoqun. Study on multi-agent and WAN based adaptive coordinated protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 15-20.
- [18] 李振兴, 龚旸, 翁汉琮, 等. 广域保护通信重负载下迂回路路径重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 40-46.
LI Zhenxing, GONG Yang, WENG Hanli, et al. Reconstruction algorithm for WAP communication network with heavy load[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 40-46.
- [19] SU Sheng, LI K K, CHAN W L, et al. Adaptive agent-based wide-area current differential protection system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(5): 2111-2117.
- [20] 李卫国, 运泽健, 张师, 等. 基于粗糙集理论的 t 检验广域保护区划分方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 122-130.
LI Weiguo, YUN Zejian, ZHANG Shi, et al. Partition method of t-test wide-area protection area based on rough set theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 122-130.
- [21] WEN Fan, YUAN Liao. Wide area measurements based fault detection and location method for transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 53-64. DOI: 10.1186/s41601-019-0121-9.
- [22] 蔡煜, 蔡泽祥, 王奕, 等. 配电网广域保护控制通信网络建模与组网策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 183-190.
CAI Yu, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Modeling and networking strategy of communication network of wide-area protection and control for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 183-190.
- [23] DAMBHARE S, SOMAN S A, CHANDORKAR M C, et al. Adaptive current differential protection schemes for transmission-line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1832-1841.
- [24] 李文正, 李宝伟, 倪传坤, 等. 智能变电站光纤差动保护同步方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 136-140.
LI Wenzheng, LI Baowei, NI Chuankun, et al. Study on synchronization method for optical differential protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 136-140.
- [25] 李会新, 王兴国, 谢俊, 等. 一种基于虚拟电流制动量的电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 75-79.
LI Huixin, WANG Xingguo, XIE Jun, et al. A transmission line current differential protection based on virtual brake current[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 75-79.
- [26] 杨国泰, 王宇飞, 罗剑波, 等. 电力 CPS 信息网络脆弱性及其评估方法[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 83-89.
YANG Guotai, WANG Yufei, LUO Jianbo, et al. Electric CPS information network vulnerability and assessment method[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 83-89.
- [27] BOCK J, HOBL A, SCHRAMN J, et al. Resistive superconducting fault current limiters are becoming a mature technology[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 25(3): 1-4.
- [28] PARK W J, SUNG B C, PARK J W. The effect of SFCL on electric power grid with wind-turbine generation system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1177-1181.
- [29] YE L, MAJOROS M, COOMBS T, et al. System studies of the superconducting fault current limiter in electrical distribution grids[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2339-2342.

收稿日期: 2020-02-29; 修回日期: 2020-05-13

作者简介:

陈艳霞(1974—), 女, 通信作者, 博士, 正高级工程师, 研究方向为继电保护及自动化技术研究及管理; E-mail: chenbepc@163.com.com

吕立平(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电自动化、继电保护; E-mail: 317089877@qq.com

李振兴(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制、智能变电站技术。E-mail: lzx2007001@163.com

(编辑 许威)