

# 直流馈入对工频变化量距离保护影响分析及改进\*

刘江山, 李凤婷<sup>†</sup>, 解超, 陈睿康  
(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 为研究直流馈入对工频变化量距离保护的影响, 建立了直流系统等值工频变化量阻抗模型, 基于不同故障程度下直流控制策略的切换, 分析了直流系统等值工频变化量阻抗的变化特性及其对工频变化量距离保护的影响. 在过渡电阻较大的情况下, 直流系统等值工频变化量阻抗呈容性, 会造成工频变化量距离保护正方向保护范围减小. 基于此, 提出了工频变化量阻抗继电器与全阻抗继电器配合的改进方法, 有效改善了由于直流馈入造成保护拒动的问题. 最后, 基于PSCAD/EMTDC的仿真结果验证了理论分析的正确性和改进措施的有效性.

**关键词:** 直流馈入; 工频变化量距离保护; 换相失败; 控制策略; 保护范围; 改进措施

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.12.29.0003

**中图分类号:** TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)06-0753-011

**引文格式:** 刘江山, 李凤婷, 解超, 等. 直流馈入对工频变化量距离保护影响分析及改进[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(6): 753-763.

**英文引文格式:** LIU J S, LI F T, XIE C, et al. Analysis and improvement of DC infeed on power-frequency variation distance protection[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(6): 753-763.

## Analysis and Improvement of DC Infeed on Power-Frequency Variation Distance Protection

LIU Jiangshan, LI Fengting, XIE Chao, CHEN Ruikang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830047, China)

**Abstract:** In order to research the influence of DC feed on power-frequency variation distance protection, the equivalent power-frequency variation impedance model of the DC system is established. Based on the switching of HVDC control strategies under different fault levels, the change characteristics of the equivalent power-frequency variation impedance of the DC system and its influence on the power-frequency variation distance protection are analyzed. It is concluded that when the fault resistance is large, the equivalent power-frequency variation impedance of the DC system is capacitive, which will cause the protection range of the power-frequency variation distance protection to be reduced in the positive direction. Based on this, an improved method for the coordination of power-frequency variation impedance relays and impedance relays is proposed, which can solve the problem of the reduction of the protection range in the positive direction caused by DC feed. Finally, the simulation results based on PSCAD/EMTDC verify the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the improvement measures.

**Key words:** DC feed; power-frequency variation distance protection; commutation failure; HVDC control strategies; protection range; improvement measures

## 0 引言

高压直流输电技术具有远距离、大容量等优势. 我国已经建成世界上最大的交直流混联电网, 对实现电力跨区传输具有重大意义. 但由于交直流电网的强耦合和非线性特性, 使得交流系统的单一故障通常会表现出复杂特性, 为直流近区域继电保护技术带来了全新的挑战<sup>[1-6]</sup>.

\* 收稿日期: 2020-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(51877185); 国家电网公司科技项目(SGXJJY00GHJS2000011).

作者简介: 刘江山(1997-), 男, 硕士生, 从事交直流混联系统保护与控制的研究, E-mail: 916721327@qq.com.

<sup>†</sup> 通讯作者: 李凤婷(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护、可再生能源并网技术及电力系统调度控制的研究, E-mail: xjlft2009@sina.com.

为了研究直流馈入对直流近区域故障特征的影响,文献[7-8]通过仿真研究了不同故障程度下的直流系统注入交流系统等值电流.文献[9]利用动态向量的方法得出直流系统等值工频电流的变化特征,在其基础上文献[10]进一步考虑了直流控制策略切换,研究了更为准确的等值工频电流的变化特征.文献[11]提出在直流系统发生换相失败故障时,直流系统等值工频变化量阻抗呈容性的特征.

直流馈入下的故障特征与纯交流系统具有明显差异,会造成保护的误动,文献[10]和文献[12-14]分别分析了直流馈入下对电流差动保护、距离保护、方向纵联保护的影响并提出了改进措施.工频变化量距离保护作为快速距离保护的I段被广泛应用于交直流电网,但是,针对工频变化量距离保护的研究多集中在纯交流的情况下.文献[15]研究认为工频变化量距离保护的保护区与保护背侧系统阻抗和保护整定阻抗的比值大小有关.文献[16]提出在实际工作中,保护背后投入的容性阻抗和保护正方向投入的故障限流器将导致工频变化量距离保护误动作.文献[17]研究了风电场实际运行方式的变化及其弱电源特性给工频变化量距离保护带来的影响.文献[18]研究了工频变化量距离保护耐受过渡电阻的能力.文献[19]通过仿真分析了直流馈入对工频变化量距离保护的影响,但缺乏深入的理论分析.文献[20]研究了送端系统故障对工频变化量距离保护的影响.综上所述,现有的研究对于直流馈入下的工频变化量距离保护并未做深入的分析,针对直流馈入工频变化量距离保护的改进措施更鲜有研究.因此,研究直流馈入对工频变化量距离保护的影响机理及其改进措施对保障系统稳定运行具有实际意义.

基于此,本文首先以受端交流系统为研究对象,建立计及直流控制策略的直流系统等值阻抗模型,分析直流馈入下直流系统等值工频变化量阻抗特性,进而深入研究直流馈入下传统工频变化量距离保护正向保护适应性问题.最后提出一种工频变化量阻抗继电器与全阻抗继电器配合使用的策略,并基于PSCAD/EMTDC平台仿真验证理论分析的正确性和所提策略的有效性.

## 1 工频变化量距离保护基本原理

工频变化量距离保护是一种通过反应突变量工频分量电压、电流而工作的距离保护.其固定门槛动作判据为

$$|\Delta \dot{U}_{op}| > k_k U_N \quad (1)$$

$$\Delta \dot{U}_{op} = \Delta \dot{U} - \Delta \dot{I} Z_{set} = -\Delta \dot{I} (Z_s + Z_{set}) \quad (2)$$

$$\Delta \dot{I} = \frac{\Delta E_K}{|Z_s + Z_m|} \quad (3)$$

其中: $\Delta \dot{U}_{op}$ 为补偿电压变化量; $k_k$ 为可靠系数,一般取1.05~1.2; $\Delta \dot{U}$ 、 $\Delta \dot{I}$ 分别是保护安装处的工频故障分量电压、电流; $Z_s$ 、 $Z_{set}$ 分别为系统阻抗和整定阻抗; $Z_m$ 为保护安装处到故障点的阻抗; $U_N$ 为系统额定电压; $\Delta E_K$ 为故障点电压源的电压.

接地故障和相间故障,补偿电压变化量的表达式为

$$\Delta \dot{U}_{op} = \Delta \dot{U}_\phi - (\Delta \dot{I}_\phi + 3K\dot{I}_0) Z_{set} \quad (4)$$

$$\Delta \dot{U}_{op} = \Delta \dot{U}_{\phi\phi} - \Delta \dot{I}_{\phi\phi} Z_{set} \quad (5)$$

其中: $\phi$ 为 $a, b, c$ ;  $\phi\phi$ 为 $ab, bc, ca$ ;  $K$ 为零序补偿系数; $\dot{I}_0$ 为保护安装处零序电流.

在正方向故障时,如图1(a)所示,工频变化量距离继电器正方向阻抗圆以 $-Z_s$ 为圆心,以 $|Z_s + Z_{set}|$ 为半径的圆,其动作方程为

$$|Z_s + Z_{set}| \geq |Z_s + Z_m| \quad (6)$$

反方向故障时,如图1(b)所示,工频变化量距离继电器反方向阻抗圆以反方向系统阻抗 $Z'_s$ 为圆心,以 $|Z'_s - Z_{set}|$ 为半径,其动作方程为

$$|Z'_s - Z_{set}| \geq |Z'_s - (-Z_m)| \quad (7)$$

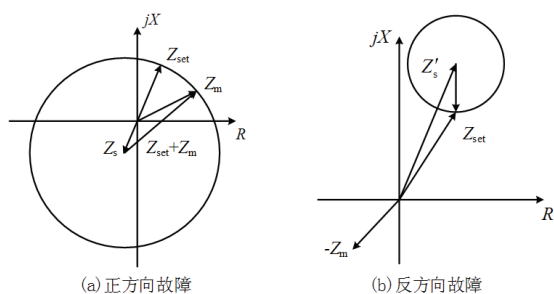


图 1 工频变化量距离继电器动作特性

Fig 1 Operating characteristics of power frequency variation distance relay

反方向故障时, 短路阻抗位于第三象限, 而动作区域位于第一象限, 保护不动作. 综上所述, 工频变化量距离保护具有明确的方向性, 可作为方向元件使用.

## 2 直流系统等值工频变化量阻抗特性分析

由上述分析可知,  $Z_s$  是决定工频变化量距离保护范围的关键. 在故障时, 交直流系统与纯交流系统的阻抗特性差异很大, 导致传统工频变化量距离保护在交直流系统中存在适应性问题.

交直流系统中, 系统阻抗是指直流系统在暂态过程中的等值工频变化量阻抗, 定义式为

$$\Delta Z_{dc} = \frac{\Delta \dot{U}}{-\Delta \dot{I}_{dc}} \quad (8)$$

式中:  $\Delta \dot{U}$  和  $\Delta \dot{I}_{dc}$  为工频变化量电压、电流.

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}' - \dot{U} \quad (9)$$

$$\Delta \dot{I}_{dc} = \dot{I}'_{dc} - \dot{I}_{dc} \quad (10)$$

式中:  $\dot{U}$ 、 $\dot{I}_{dc}$  是正常运行状态换流母线电压、逆变侧注入交流系统等值电流;  $\dot{U}'$ 、 $\dot{I}'_{dc}$  是故障下换流母线电压、逆变侧注入交流系统等值电流.

为分析直流系统等值工频变化量阻抗变化规律, 采用图2所示交直流系统进行分析<sup>[11]</sup>.

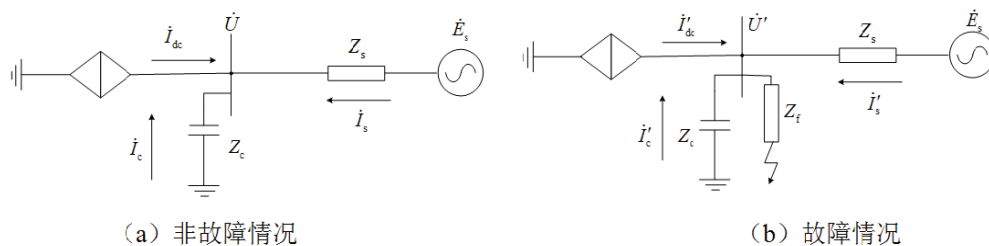


图 2 直流馈入交流系统等值电路

Fig 2 AC/DC system equivalent circuit

非故障情况下可得

$$\dot{E}_s - \dot{U} = \left( \frac{\dot{U}}{Z_C} - \dot{I}_{dc} \right) Z_s \quad (11)$$

故障情况下

$$\dot{U}' = \left( \dot{I}'_{dc} + \frac{\dot{E}_s - \dot{U}'}{Z_s} \right) (Z_C // Z_f) \quad (12)$$

式(11)与式(12)相加可得直流系统等值工频变化量阻抗

$$\Delta Z_{dc} = -Z_{\Sigma} - [Z_{\Sigma} - Z_s // Z_C] \cdot \frac{\dot{E}_s}{Z_s \Delta \dot{I}_{dc}} \left[ \frac{Z_s \dot{I}_{dc}}{\dot{E}_s} + 1 \right] \quad (13)$$

式中:  $Z_{\Sigma} = Z_c // Z_f // Z_s$ ;  $Z_s$  为交流系统阻抗;  $\dot{E}_s$  为系统等值电源电压;  $Z_c$  为无功补偿装置等值阻抗;  $Z_f$  为短路点过渡电阻.

当过渡电阻较大时, 对式(13)进行简化可得

$$K = \left[ \frac{Z_s \dot{I}_{dc}}{\dot{E}_s} + 1 \right] = \left[ \frac{1}{K_{SCR} e^{j\delta}} + 1 \right] \quad (14)$$

$$\Delta Z_{dc1} \approx -\frac{K Z_s \dot{E}_s}{Z_f \Delta \dot{I}_{dc}} - Z_s \quad (15)$$

式中:  $K_{SCR}$  为短路比,  $\delta$  为  $\dot{E}_s$  超前  $\Delta \dot{I}_{dc}$  的角度.

由于  $K_{SCR} \gg 1$ , 所以,  $K$  可近似为一个大于1的定值. 由式(15)可知,  $\Delta Z_{dc}$  与  $Z_s$  成正比, 而与  $\Delta \dot{I}_{dc}$  变化趋势相反.

当过渡电阻较小时, 对式(13)进行简化可得

$$\Delta Z_{dc2} \approx -\frac{Z_s}{Z_s + Z_f} \left( Z_f + K \frac{E_s}{\Delta \dot{I}_{dc}} \right) \quad (16)$$

由式(16)可知, 随着过渡电阻的减小,  $Z_s / (Z_s + Z_f)$  将趋近于1,  $Z_s$  对  $\Delta Z_{dc}$  的影响程度降低. 对式(15)、式(16)求偏导可得

$$\frac{\partial \Delta Z_{dc1}}{\partial \Delta \dot{I}_{dc}} \approx \frac{Z_s K \dot{E}_s}{Z_f \Delta \dot{I}_{dc}^2} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Delta Z_{dc2}}{\partial \Delta \dot{I}_{dc}} \approx \frac{Z_s K \dot{E}_s}{(Z_f + Z_s) \Delta \dot{I}_{dc}^2} \quad (18)$$

显然, 式(18)的值恒小于式(17)的值, 在过渡电阻较小时,  $\Delta \dot{I}_{dc}$  对  $\Delta Z_{dc}$  影响更大,  $\Delta Z_{dc}$  的幅值变化将大于过渡电阻较大的时候.

由式(13)、(15)和(16)可以看出, 直流系统等值阻抗与系统阻抗、无功补偿装置等效阻抗、等值工频变化量电流等有关系. 获取直流系统等值阻抗变化规律的关键是得到故障下逆变侧注入交流系统等值工频电流变化情况, 现采用计及控制策略切换的直流系统等效方法对直流系统等值工频变化量电流进行计算. 根据动态相量理论可得直流系统注入逆变侧交流系统等值交流电流的  $P$  阶相量  $\dot{I}_{dc(k)}$  为<sup>[10]</sup>

$$\dot{I}_{dc(k)} = \sum_m \langle i_{dc} \rangle_{n-m} \langle s_i \rangle_m \quad (19)$$

式中:  $i_{dc}$  是逆变侧直流电流;  $s_i$  为各项电流开关函数;  $m$  和  $n$  为相应的动态相量的阶数;  $\langle a \rangle$  表示动态向量. 由于工频变化量阻抗是基于工频变化量电流和电压, 所以取  $n=1$ ,  $m=1$ .

逆变侧交流系统故障导致换流母线处交流电压下降, 这种情况下, 逆变侧直流电压下降并引起直流电流的迅速上升. 不同的故障严重程度会导致控制系统动作情况不同, 故障暂态期间直流电流特性也会有所差异, 如图3所示.

当故障导致直流电压跌落不严重时, 即逆变侧直流电压  $U_{dc}$  大于 0.9 p.u., VDCOL 输出指令值不变, 此时整流侧的定电流控制器指令值不变; 而逆变器始终采取定关断角控制, 随着交流电压的下降, 直流电流的上升, 逆变器关断角下降, 导致CEA主动降低其触发角指令值, 以避免换相失败, 此举会导致逆变器消耗无功增多, 引起故障初期直流电流进一步增大. 该情况下直流电流波形见图3中蓝色曲线.

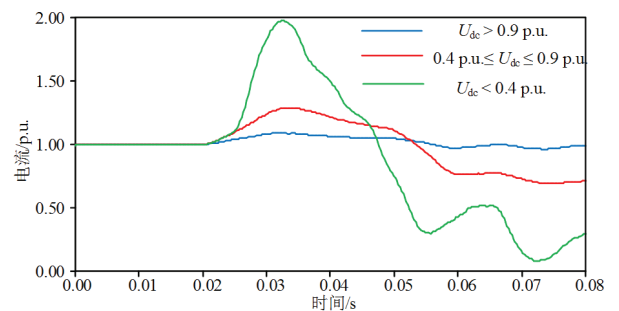


图3 直流电流变化曲线

Fig 3 The variation curve of DC current under different faults

当故障导致直流电压进一步跌落时, 即 $0.4 \text{ p.u.} \leq U_{dc} \leq 0.9 \text{ p.u.}$ , VDCOL输出指令值会随直流电压的跌落程度的增加而降低, 整流侧的定电流控制器指令值将介于 $0.55 \text{ p.u.} \sim 1.0 \text{ p.u.}$ . 随着交流电压的下降, 直流电流的上升, CEA主动调高触发角, 进而降低整流侧直流电压, 使直流系统两端电压差降低, 直流电流减少. 该情况下直流电流波形见图3中红色曲线.

当直流电压跌落至 $0.4 \text{ p.u.}$ 以下时, VDCOL输出指令值会保持 $0.55 \text{ p.u.}$ 不变, 整流侧的定电流控制器指令值为 $0.55 \text{ p.u.}$ , CEA同样会调高触发角, 使直流电流下降, 但由于CEA的指令值与实际电流值相差较大, 因此直流电流下降速度会大大加快, 该情况下直流电流波形见图3中绿色曲线.

将直流电流代入式(19)中可以得到准确的直流系统等值工频电流. 当 $U_{dc} > 0.9 \text{ p.u.}$ 时, 直流系统等值工频电流始终大于正常运行时的电流; 当 $U_{dc} \leq 0.9 \text{ p.u.}$ 时, 直流系统等值工频电流先增加, 后减小至正常运行电流以下. 随着 $U_{dc}$ 跌落程度的增加, 直流系统等值工频电流突增的幅值越大, 下降速度越快, 如图4所示.

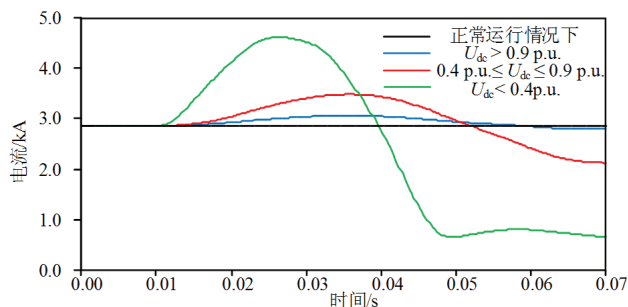


图 4 直流系统等值工频电流

Fig 4 Equivalent power frequency current of DC system

显然, 直流系统等值工频变化量电流的幅值先增大后减小; 随着故障严重程度的增加, 其增大的幅值也会越大.

逆变侧无功补偿策略为全补偿, 逆变侧无功消耗为直流功率的 $50\% \sim 60\%$ , 所以 $\dot{I}_{dc}$ 超前 $\dot{U}_1$ . 假设电网故障下交流母线电压只有幅值的跌落, 并无相位的变化. 当过渡电阻较大, 故障程度较轻时, 直流从受端吸收无功,  $\dot{I}_{dc}$ 的幅值变化不大, 并向逆时针旋转一个较小的角度, 处于第一象限, 其相电压、电流相位关系如图5 (a) 所示,  $\Delta \dot{I}_{dc}$ 超前 $\Delta \dot{U}_1$ , 直流系统等值阻抗 $\Delta Z_{dc}$ 呈容性, 与纯交流系统不同. 当过渡电阻较小, 故障较严重时, 直流从受端吸收大量的无功功率,  $\dot{I}_{dc}$ 的幅值会减小, 同时向顺时针旋转较大的角度, 处于第一或第四象限, 其相电压、电流相位关系如图5 (b) 所示,  $\Delta \dot{U}_1$ 超前 $\Delta \dot{I}_{dc}$ , 直流系统等值阻抗 $\Delta Z_{dc}$ 呈感性, 与纯交流系统相同.

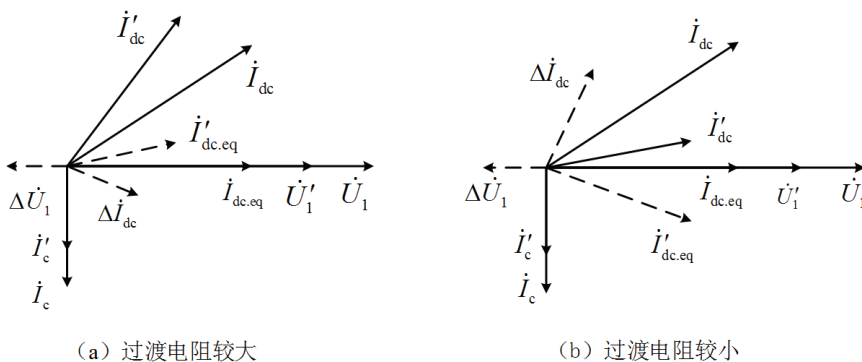


图 5 故障情况下电压电流的关系

Fig 5 Phasor diagram of currents and voltages for faults

由上述分析可知, 在过渡电阻较大时, 直流系统等值工频变化量阻抗呈容性, 幅值会先减小后增大; 当过渡电阻较小时, 直流系统等值工频变化量阻抗呈感性, 幅值同样会先减小后增大, 且会增大到一个较大的阻抗值. 等值工频变化量阻抗的幅值、相位特性在过渡电阻较大时与纯交流系统阻抗特性不同, 会改变工频变化量距离保护的故障圆特性的圆心位置和半径长度, 造成保护不正确动作.

### 3 直流馈入对工频变化量距离保护影响

联立式(1)、式(2)和式(3)推导可得

$$|Z_s + Z_{et}| > \frac{k_k U_N}{\Delta E_K} |Z_s + Z_m| \tag{20}$$

等式两边同时除以 $k_k U_N / \Delta E_k$

$$\left| \frac{\Delta E_K}{k_k U_N} Z_s + \frac{\Delta E_K}{k_k U_N} Z_{et} + Z_s - Z_s \right| > |Z_s + Z_m| \quad (21)$$

直流馈入下的系统阻抗等于直流系统等值工频变化量阻抗,因此直流馈入下的阻抗圆特性

$$|\Delta Z_{dc} + Z'_{et}| > |\Delta Z_{dc} + Z_m| \quad (22)$$

忽略负荷的影响

$$Z'_{et} = \frac{1}{k_k} (\Delta Z_{dc} + Z_{set}) - \Delta Z_{dc} = \left( \frac{1}{k_k} - 1 \right) \Delta Z_{dc} + \frac{1}{k_k} Z_{set} \quad (23)$$

由式(22)、(23)可以看出直流馈入下的阻抗圆特性会受到 $\Delta Z_{dc}$ 和 $Z'_{et}$ 的影响,并且 $Z'_{et}$ 还会受到 $\Delta Z_{dc}$ 和 $k_k$ 的影响.因此,直流馈入造成 $\Delta Z_{dc}$ 的变化,会引起保护范围的减小.

### 3.1 直流系统工频变化量阻抗对保护范围的影响

交直流系统工频变化量距离保护阻抗圆特性,是以 $-\Delta Z_{dc}$ 为圆心,  $|\Delta Z_{dc} + Z'_{et}|$ 为半径的圆.直流系统发生换相失败时,直流系统工频变化量阻抗呈容性,位于第三象限、第四象限,阻抗圆的圆心位于第二象限.而纯交流系统的系统阻抗呈感性,阻抗圆的圆心位于第三象限.因此,直流馈入会导致阻抗圆偏移,正方向保护范围减小.

由上述分析可知,过渡电阻越小,故障越严重,直流系统等值工频变化量阻抗幅值越大,正方向保护范围越小.阻抗圆特性如图6所示,  $A_1$ 为纯交流系统下的阻抗圆动作特性,  $A_2$ 为直流馈入下阻抗圆动作特性,  $A_3$ 为直流系统等值工频变化量阻抗幅值较小的阻抗圆动作特性.

显然,直流馈入造成阻抗圆特性的圆心偏移,工频变化量距离保护正方向保护范围减小.

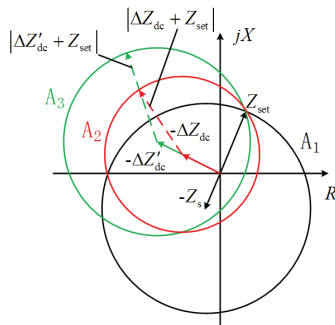


图 6 直流馈入下工频变化量距离元件动作特性

Fig 6 Operating characteristics of distance element based on the power-frequency variation in HVDC system

### 3.2 整定阻抗对保护范围的影响

#### 3.2.1 可靠系数对整定阻抗的影响

由公式(23)可以知道,  $Z'_{set}$ 会受到 $\Delta Z_{dc}$ 和纯交流系统下的阻抗圆整定阻抗 $Z_{set}$ 的影响.随着 $k_k$ 的增大,  $Z_{set}$ 对 $Z'_{set}$ 的影响会降低,而系统等值阻抗 $Z_s$ 会成为影响 $Z'_{set}$ 的主要因素.  $Z'_{set}$ 随 $k_k$ 变化如图7所示,图中 $k_{k1} < k_{k2}$ .

由图7可以看出,随着 $k_k$ 的增大,  $Z'_{set}$ 的幅值不断降低,且向第二象限趋近.由式(22)可得,工频变化量阻抗圆的半径会逐渐变小,导致正方向保护范围降低,当 $k_k$ 增大到一定程度后,正方向可能会失去保护范围.

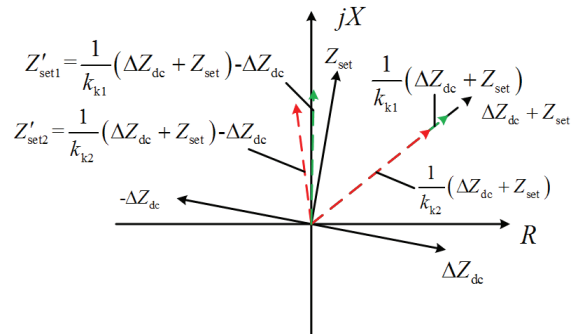


图 7 整定阻抗随可靠系数变化向量图

Fig 7 Schematic diagram of setting impedance changing with reliability coefficient

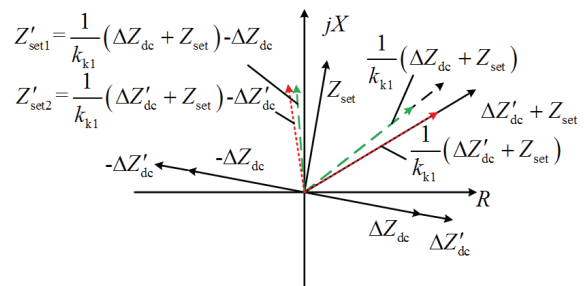


图 8 整定阻抗随系统阻抗变化示意图

Fig 8 Schematic diagram of setting impedance changing with system impedance

### 3.2.2 直流系统等值阻抗对整定阻抗的影响

由上述分析可知,故障越严重,直流系统等值阻抗越大. 当 $k_k$ 一定时,随着直流系统等值阻抗的增加, $Z'_{set}$ 的幅值会不断增加,并且逐渐向第二象限转动,导致正方向保护范围减小,当故障严重到一定程度后,正方向会失去保护范围.  $Z'_{set}$ 随 $\Delta Z_{dc}$ 变化如图8所示.

图中 $\Delta Z'_{dc}$ 的幅值大于 $\Delta Z_{dc}$ ,由图8可以看出,相比 $Z'_{set1}$ , $Z'_{set2}$ 幅值增大,并且向第二象限移动,正方向保护范围减小.

## 4 工频变化量距离保护改进策略

为解决直流馈入造成保护正方向范围减小的问题. 提出工频变化量阻抗继电器与全阻抗继电器配合使用的方法.

全阻抗继电器的特性圆的圆心位于原点,正方向整定阻抗与反方向整定阻抗大小相等, $Z_{set1} = Z_{set2}$ ,动作区域如图9所示.

其动作特性为

$$|Z_{set}| \geq |Z_m| \tag{24}$$

$$|\dot{I}_m Z_{set}| \geq |\dot{U}_m| \tag{25}$$

式中: $\dot{U}_m$ 为保护安装处测量电压; $\dot{I}_m$ 为保护安装处测量电流.

全阻抗圆特性在各个方向上的动作阻抗都相同,正反方向故障下具有相同的保护区,不容易受到系统变化的影响,但本身不具有方向性,在双端电源系统中,应该与方向元件配合使用. 而工频变化量阻抗继电器在正方向保护时快速可靠动作,而在反方向故障时,可靠不动作,因此可以作为方向元件使用. 两种继电器取长补短,提出工频变化量阻抗继电器与全阻抗继电器采用或相互配合策略,配合方式如图10所示.

工频变化量阻抗继电器仍采用固定门槛动作判据. 纯交流系统和直流馈入下的阻抗圆如图11中 $A_1$ 、 $A_2$ 所示. 全阻抗圆继电器动作范围如阻抗圆 $A_3$ 所示. 全阻抗继电器以工频变化量阻抗继电器的初始整定阻抗为半径,以原点为圆心,内切与工频变化量正方向阻抗圆.

由图11可知,全阻抗继电器的阻抗圆特性与工频变化量阻抗继电器不同,其圆心位于原点处,因此,无论系统如何变化,均不改变其阻抗圆的位置. 而全阻抗继电器阻抗圆的半径为整定阻抗,与保护安装处所测得电气量的变化无关. 因此全阻抗继电器的动作特性不受直流馈入的影响.

两继电器采用如图12所示方式进行配合动作.

全阻抗继电器和工频变化量阻抗继电器协同工作. 故障发生时刻,工频变化量阻抗继电器作为方向元件,对故障方向进行判断. 当发生反方向故障时,发出信号闭锁两继电器,保护不动作. 当发生正方向故障时,两个继电器同时工作,当满足工频变化量距离

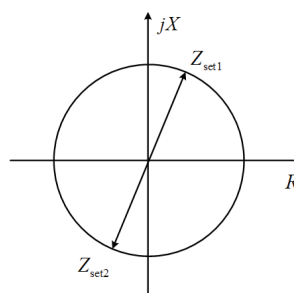


图 9 全阻抗圆特性

Fig 9 Operating characteristics of impedance relay

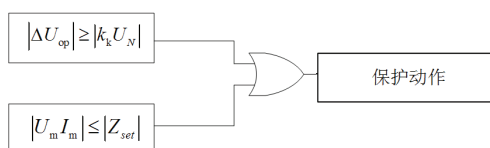


图 10 工频变化量阻抗继电器与全阻抗继电器配合

Fig 10 Cooperation between power frequency variation impedance relay and impedance relay

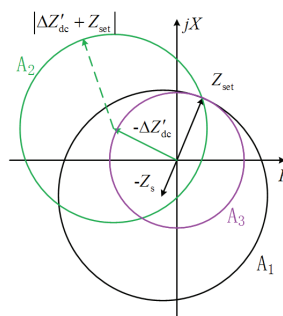


图 11 两继电器配合动作特性

Fig 11 Operating characteristics of two impedance relays

继电器动作特性时,发出动作信号,保护动作.全阻抗继电器在接受到工频变化量发出的动作信号后,闭锁继电器,不发出动作信号.

当不满足工频变化量阻抗继电器的动作特性时,工频变化量阻抗继电器将不发出动作信号,全阻抗继电器进行判定,如果满足动作条件且没有工频变化量阻抗继电器发出动作的信号,保护动作.若不满足动作条件,全阻抗继电器和工频变化量阻抗继电器均不发出动作信号,保护不动作.

### 5 仿真实验

#### 5.1 直流馈入等值系统阻抗特性仿真验证

工频变化量阻抗继电器主要受 $\Delta Z_{dc}$ 的影响而导致正方向保护范围减小,基于PSCAD/EMTDC建立如图13所示模型.仿真模型采用GIGRE HVDC的标准测试系统,在其基础上搭建交直流混联系统仿真模型,不改变直流系统的情况下,调整了受端交流系统的容量.

受过渡电阻影响,导致交流系统换流母线电压跌落情况不同,引起的直流系统换相失败情况不同.当受端系统SCR=2.5时,逆变侧交流母线电压发生A相经过渡电阻接地故障,分别经60Ω、100Ω、140Ω接地,其中A相经140Ω过渡电阻接地时,未发生换相失败,为发生换相失败的临界值;当受端系统SCR=5时,逆变侧交流母线电压发生A相经过渡电阻接地故障,分别经30Ω、50Ω、70Ω接地,其中A相经70Ω过渡电阻接地时,未发生换相失败,为发生换相失败的临界值,直流系统等值工频变化量阻抗仿真结果如图14、图15所示.

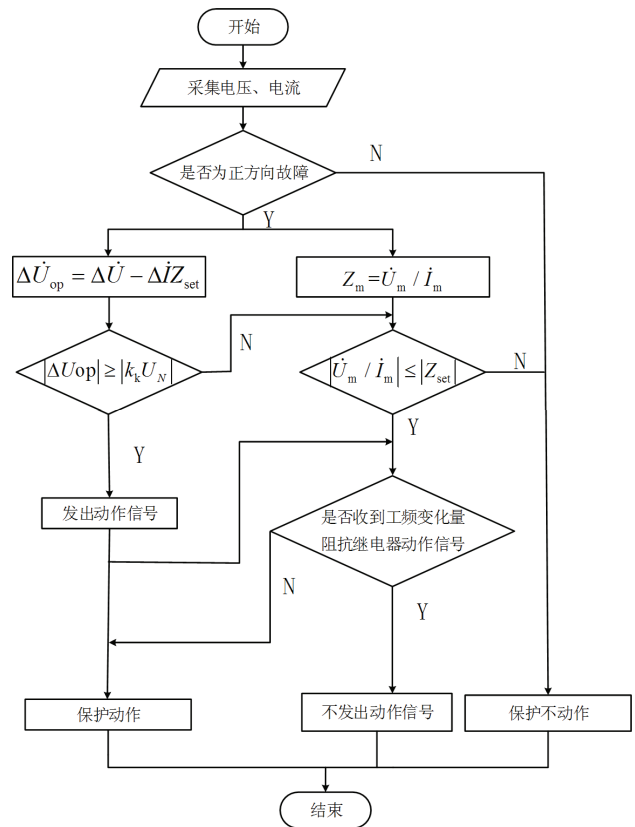


图 12 工频变化量阻抗继电器与全阻抗继电器配合流程图

Fig 12 Flow chart of cooperation between power frequency variation impedance relay and impedance relay

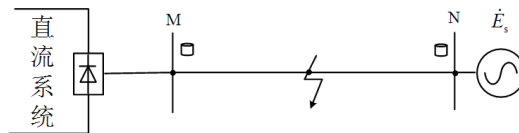


图 13 HVDC仿真模型

Fig 13 Simulation model of HVDC system

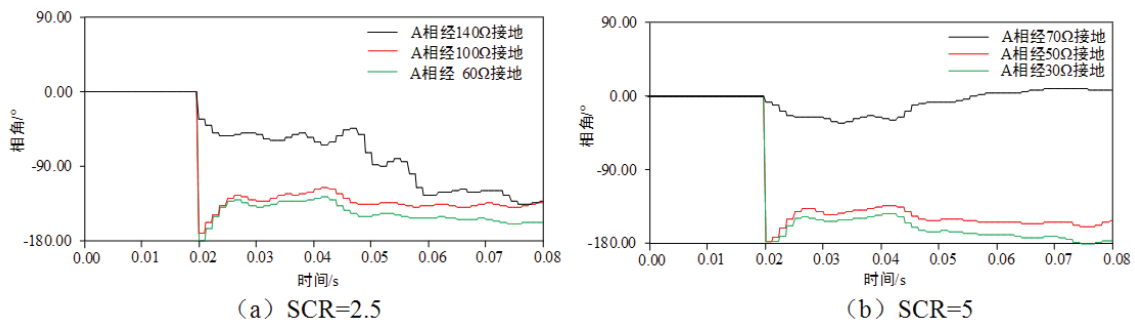


图 14 不同故障下直流系统等值工频变化量阻抗相角

Fig 14 DC-system impedance phase based on power-frequency variation under different commutation failure

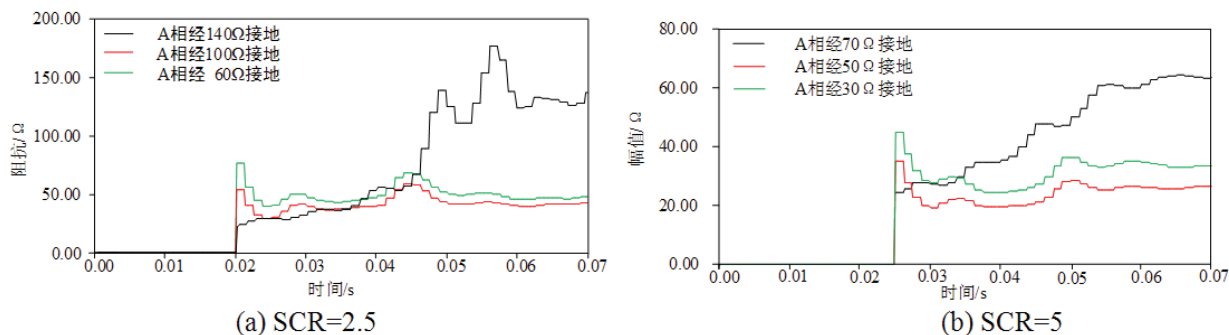


图 15 不同故障下直流系统等值工频变化量阻抗幅值

Fig 15 DC-system impedance amplitude based on power-frequency variation under different commutation failure

由图14、图15可知, 直流系统等值工频变化量阻抗幅值在未发生换相失败时, 持续上升. 在换相失败的过过程中, 幅值先突增后减小. 在一定过渡电阻下, 直流系统等值工频变化量阻抗呈容性.

### 5.2 工频变化量距离保护改进策略仿真验证

设定系统参数, 线路长度为50 km, 线路正序参数如表1所示.

表 1 线路参数  
Tab 1 Line parameters

线路参数	$r(\Omega/m)$	$l(\Omega/m)$	$c(m\Omega \cdot m)$
正序	$0.1782 \times 10^{-4}$	$0.3138 \times 10^{-3}$	273.544 8
零序	$0.2952 \times 10^{-3}$	$0.10399 \times 10^{-2}$	414.164 2

采用式(1)和式(5)作为工频变化量阻抗元件的判据, 可靠系数取1.1, 保护范围为线路全长的80%. 分别在线路出口保护安装处、线路全长40%、线路全长60%处发生AB两相短路, 以上故障均为区内故障. 工频变化量距离继电器判定的仿真结果如图16所示.

全阻抗继电器采用式(25)作为判据, 仿真结果如图17所示. 图中黑色的线为继电器测量电压, 红色的线为保护末端整定电压.

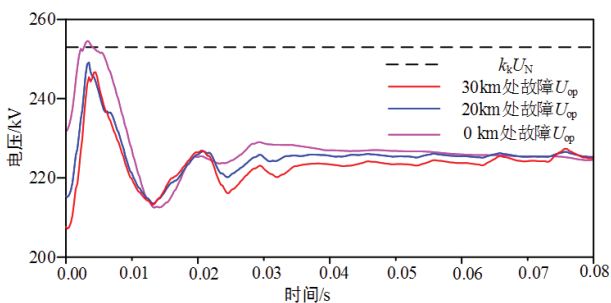


图 16 区内故障工频变化量距离元件判定结果

Fig 16 Response of power frequency variation impedance relay under internal faults

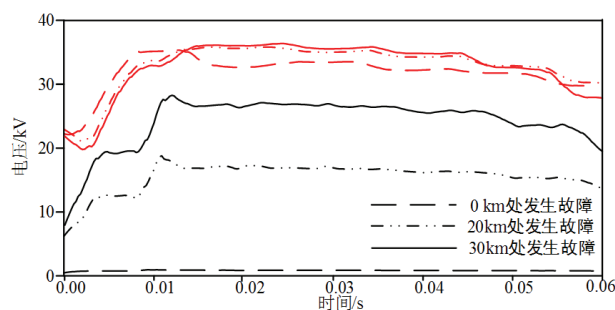


图 17 区内故障全阻抗距离元件判定结果

Fig 17 Response of impedance relay under internal fault

仿真结果表明, 在线路出口处故障时, 存在补偿电压幅值大于工频变化量阻抗继电器的整定电压幅值的现象. 除此之外, 工频变化量阻抗继电器的整定电压幅值均大于补偿电压幅值, 因此, 工频变化量距离保护不能正确发出动作信号. 而全阻抗继电器的整定电压均大于继电器测量电压, 因此可以正确发出动作信号, 使保护正确动作.

在线路末端发生AB两相短路故障时, 仿真结果如图18、图19所示. 由图18、图19可知, 在区外故障时, 工频变化量阻抗继电器和全阻抗继电器均不会发出动作指令, 保护不会动作, 验证了所提改进措施的有效性.

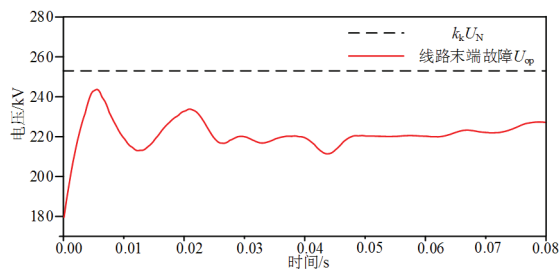


图 18 区外故障工频故障分量距离元件判定结果

Fig 18 Response of power frequency variation impedance relay under external faults

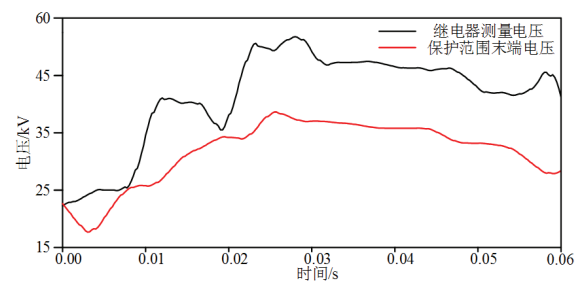


图 19 区外故障全阻抗距离元件判定结果

Fig 19 Response of impedance relay under external fault

## 6 结论

本文以CIGRE HVDC标准测试模型为例,研究了直流馈入对工频变化量距离保护的影响,并提出全阻抗继电器与工频变化量阻抗继电器相互配合的改进措施,得出如下结论。

(1) 直流馈入下直流侧等值工频变化量阻抗呈容性,处于第三或第四象限,使得阻抗圆圆心由纯交流时候的第三象限变为第二象限,使得阻抗圆由第一象限向第二象限移动,造成正方向保护范围的减小。可靠系数的增大会进一步造成正方向保护范围的减小。

(2) 全阻抗继电器与工频变化量阻抗继电器的配合使用,可以有效地防止由于直流馈入而造成工频变化量阻抗继电器区内拒动,同时兼顾保护的方向性和速动性。

(3) 全阻抗继电器虽能防止区内故障不正确动作,但由于其动作圆特性内切于工频变化量阻抗继电器,所以保护范围会略有减小。

本文通过仿真验证了上述结论的正确性和有效性,研究成果可为交直流混联系统其他类型保护提供思路,对于维护交直流混联系统安全稳定运行具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 尹纯亚,李凤婷,张增强,等.直流闭锁引发多馈出直流系统换相失败分析[J].新疆大学学报(自然科学版),2019,36(2):138-145.  
YIN C Y, LI F T, ZHANG Z Q, et al. Commutation failure analysis of multi-outfeed HVDC system caused by DC blocking[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2019, 36(2): 138-145. (in Chinese)
- [2] 鲁月华,樊艳芳,罗瑞.适用于交直流混联系统的时域全量故障模型判别纵联保护方案[J].电力系统保护与控制,2020,48(19):81-88.  
LU Y H, FAN Y F, LUO R. Principle of active distribution network pilot protection based on time domain model identification[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 81-88. (in Chinese)
- [3] 王锐铭,李凤婷.一种改善直流系统恢复特性的低压限流环节优化方法[J].新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2021,38(2):235-241+250.  
WANG R M, LI F T. An optimization method of VDCOL to improve the recovery characteristics of DC system[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(2): 235-241+250. (in Chinese)
- [4] 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):3107-3118.  
DONG X Z, TANG Y, BU G Q, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3118. (in Chinese)
- [5] 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 J L, ZHANG J K, JIAO Z B, et al. AC fault characteristic analysis of AC-DC hybrid transmission grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1461-1467. (in Chinese)
- [6] 李永丽,杨子荷,宋金钊,等.HVDC馈入及其换相失败对交流电网选相元件的影响分析[J].电网技术,2020,44(5):1825-1834.  
LI Y L, YANG Z H, SONG J Z, et al. Influence analysis of HVDC and commutation failure on AC phase selector[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1825-1834. (in Chinese)
- [7] 申洪明,黄少锋,费彬.HVDC换相失败暂态特性及其对差动保护的影响分析和对策[J].电力自动化设备,2015,35(4):109-114+120.

- SHEN H M, HUANG S F, FEI B. Transient characteristic of HVDC system during commutation failure, its effect on differential protection and countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 109-114+120. (in Chinese)
- [8] 申洪明, 黄少锋, 费彬. 交直流互联系统对距离保护动作特性的影响分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 58-63+82. SHEN H M, HUANG S F, FEI B. Effect analysis of AC-DC interconnected network on distance protection performance and countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 58-63+82. (in Chinese)
- [9] 刘俊磊, 王钢, 李海锋, 等. HVDC系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 111-118. LIU J L, WANG G, LI H F, et al. Mechanism analysis of HVDC commutation failure influence on AC power network relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 111-118. (in Chinese)
- [10] 杨子荷, 李永丽, 宋金钊, 等. 直流馈入下交流系统故障特性分析及故障分量电流差动保护改进[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 3-10. YANG Z H, LI Y L, SONG J Z, et al. Fault characteristics analysis and fault component current differential protection improvement of AC system with infeed DC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 3-10. (in Chinese)
- [11] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(一)直流系统等值工频变化量阻抗模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 41-46. LI H F, ZHANG P, WANG G, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC-AC interconnected system, part one: DC-system equivalent impedance of power-frequency component variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 41-46. (in Chinese)
- [12] 张健康, 索南加乐, 孙成, 等. 基于参数识别的纵联保护在交直流混联电网中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 34-39. ZHANG J K, SUONAN J L, SUN C, et al. Application of pilot protection based on parameter identification in AC-DC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 34-39. (in Chinese)
- [13] 费彬, 黄少锋, 申洪明. 交直流互联系统对距离保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 15-21. FEI B, HUANG S F, SHEN H M. Impact of AC-DC interconnected system on distance protection and countermeasure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 15-21. (in Chinese)
- [14] 罗瑞, 樊艳芳. 交直流系统连锁故障引发功率倒向方向保护策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 189-197. LUO R, FAN Y F. Directional protection strategy of power inversion caused by chain fault of AC-DC hybrid system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 189-197. (in Chinese)
- [15] 索南加乐, 何方明, 焦在滨, 等. 工频变化量距离元件特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 59-65. SUONAN J L, HE F M, JIAO Z B, et al. Research on the characteristics of distance element based on the power-frequency voltage and current variation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 59-65. (in Chinese)
- [16] 徐妍, 陆广香, 徐晓敏, 等. 关于工频变化量距离保护可靠性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 51-57. XU Y, LU G X, XU X M, et al. Research on the reliability of the distance protection using power-frequency variable components[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 51-57. (in Chinese)
- [17] 徐岩, 林旭涛, 赵亮, 等. 大型风电场对工频故障分量距离保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 118-125. XU Y, LIN X T, ZHAO L, et al. Research on impact of large wind farms on distance relay using power fault component[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 118-125. (in Chinese)
- [18] 雷霖, 赖真良, 朱家龙, 等. 工频变化量距离继电器耐受过渡电阻性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 26-33. LEI L, LAI Z L, ZHU J L, et al. Performance analysis of endure transition resistance of distance relay based on the power-frequency voltage and current variation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 26-33. (in Chinese)
- [19] 张健康, 索南加乐, 何方明, 等. 交直流混联电网工频变化量距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 98-103. ZHANG J K, SUONAN J L, HE F M, et al. Performance of distance protection based on fault component applied to AC-DC hybrid grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 98-103. (in Chinese)
- [20] 蔡东晓, 李海锋, 祝新驰, 等. 送出直流对工频变化量元件的影响机理分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 1-9. CAI D X, LI H F, ZHU X C, et al. Mechanism analysis of the impact of DC system on power-frequency variation protections[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 1-9. (in Chinese)