

交直流系统连锁故障引发功率倒向方向保护策略

罗 瑞,樊艳芳

(新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:针对目前交直流混联系统连锁故障引发的功率倒向导致纵联方向保护存在适应性的问题,以交流线路发生率较高的单相接地故障为例,在分析了过渡电阻对功率倒向和工频故障电流频率偏移影响的基础上,根据故障后母线电压突变量、故障点电压突变量、补偿电压突变量幅值之间的关系提出一种基于补偿电压突变量的本地信息判据方法。该方法不需要通信设备的参与,仅靠本地的故障信息进行区内外故障判别,不受交直流混联系统功率倒向的影响,并利用频率修正算法对故障电流进行修正。利用PSCAD软件建模仿真验证了该方法的有效性。

关键词:交直流混联;连锁故障;功率倒向;补偿电压;本地信息整定计算;频率偏移修正

中图分类号:TM 773

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912016

0 引言

特高压直流输电在技术和经济上的优势,使其在长距离、大容量输电中得到了广泛的应用,目前我国电网已形成了较明显的交直流混联电网的特征^[1]。纵联方向保护由于具有原理简单、易实现、灵敏度高的特点,目前已经成为高压交流线路广泛采用的一种快速保护^[2-4]。近年来,北涌乙线^[6]、横东甲乙线的纵联方向保护误动事故^[13],都是由交直流混联系统连锁故障引起功率倒向造成的。纵联方向保护在交直流混联系统的适应性问题亟待解决。

在交直流混联系统中,交流线路故障可能会引起直流侧逆变站换相失败发生连锁故障,进而导致故障电流出现频率偏移的同时交流系统出现功率倒向的情况,对交流线路纵联方向保护动作造成不利影响^[5-9]。文献[9-13]提出当交流系统发生功率倒向时,通过设置延时闭锁保护,躲过功率倒向过程,但对于非故障线路功率倒向后发生内部故障的情况,这种方法会造成保护动作延时,不利于故障的快速切除。文献[9,14]提出减小保护装置的正方向保护范围,但是这样降低了保护装置的灵敏性,会出现正方向故障保护拒动的情况。现有研究方法并未实质性地解决功率倒向对纵联方向保护的影响。

文献[2-4]提出一种基于补偿电压突变量的方向判据,该判据与基本相位比较的方法相比,具有原理简单、动作速度快、易于实现以及受故障点过渡电阻影响小的特点。本文结合补偿电压突变量方向判

据的思路,根据故障后母线电压突变量、故障点电压突变量、补偿电压突变量幅值之间的关系,提出基于补偿电压突变量的本地信息判据,并利用频率修正算法对故障电流进行修正。本文方法不需要通信设备的参与,并且不受功率倒向的影响。对所提方法在交直流混联系统复杂暂态工况下的适应性进行了分析,并进行仿真验证。

1 交直流混联系统连锁故障引发功率倒向

在交直流混联系统中,交流线路故障会使得交流线路电压降低,导致逆变站没有足够的电压支撑,从而引起直流换相失败。对交直流混联系统而言,交流故障点是一个初始扰动源,换相失败的直流系统相当于1个新的扰动源。交直流混联系统故障示意图如图1所示。当交流线路点 k_1 发生故障时,直流系统和交流系统提供的故障电流分别为 I_1 、 I_2 ;当直流系统发生换相失败时,直流系统表现的扰动为扰动点 k_2 ,此时 I_1 、 I_2 会出现“竞争”,若 I_2 强于 I_1 ,则电流方向变为 I ,即发生功率倒向。

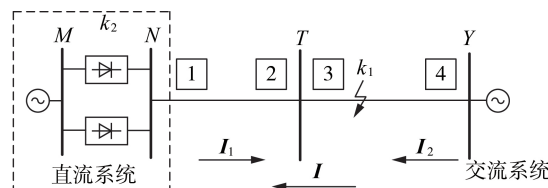


图1 交直流混联系统故障示意图

Fig.1 Fault diagram of AC/DC hybrid system

从整个系统的角度出发可以发现交直流混联系统的功率倒向表现为复故障特征,即由交流线路故障引起交直流混联系统的连锁故障。由于方向保护元件在设计之初仅适用于单一故障点,在复故障情况下适应性较差^[15],因此在交直流混联系统发生连锁故障时的适应性存在问题。

在图1中保护装置3出口处(点 k_1)设置0.3 s发生

收稿日期:2019-04-10;修回日期:2019-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51767023);2017年度新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2017D01C028)
Project support by the National Natural Science Foundation of China(51767023) and 2017 Xinjiang Uygur Autonomous Region Natural Science Fund Joint Project(2017D01C028)

单相接地故障,故障后的逆变侧关断角和装置3处测量的有功功率、无功功率如图2所示。图2中各变量下标1、2、3、4分别对应点 k_1 发生金属性接地和经 $10\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 过渡电阻接地故障的情况。由图2(a)可见,点 k_1 发生金属性接地和经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地故障时,发生换相失败,点 k_1 发生经 $50\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 过渡电阻接地故障时没有发生换相失败。由图2(b)可见, P_1 、 Q_1 在 $0.335\ \text{s}$ 发生倒向; P_2 发生大幅度下降但没有发生倒向、 Q_2 在 $0.325\ \text{s}$ 发生倒向; P_3 、 P_4 和 Q_3 、 Q_4 均没有发生倒向。

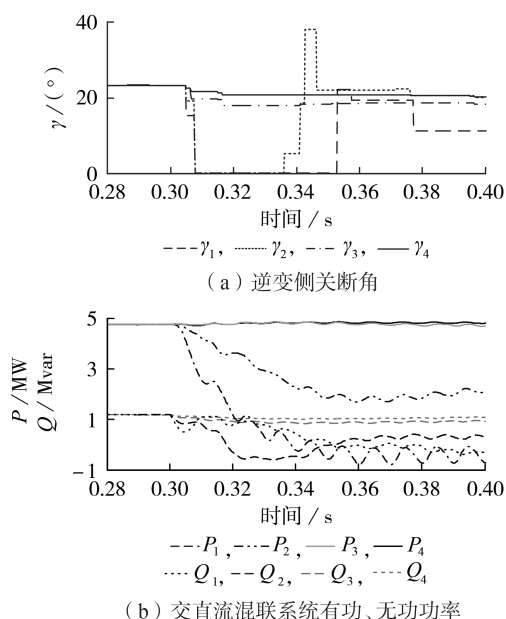


图2 点 k_1 发生故障后的故障信息

Fig.2 Fault information after fault occurrence at Point k_1

直流逆变站是否发生换相失败、交流系统功率流向受交流侧接地故障过渡电阻大小的影响。交流侧发生金属性接地故障和经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地故障时会导致直流换相失败,引起连锁故障进而发生功率倒向;发生 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 过渡电阻接地故障时,故障对直流侧影响较小,因此不会出现换相失败和功率倒向的情况。

2 传统工频突变量方向元件在交直流混联系统中的适应性分析

2.1 传统工频突变量方向元件的适应性分析

规定双电源系统中电流正方向为母线流向线路,当线路发生故障时电压、电流关系如式(1)和式(2)所示。

发生正方向故障时有:

$$\Delta U = -\Delta I Z_s \quad (1)$$

发生反方向故障时有:

$$\Delta U = \Delta I Z'_s \quad (2)$$

其中, ΔU 、 ΔI 分别为保护安装处(即母线处)的工频

突变量电压、电流值; Z_s 为保护安装处背侧系统阻抗; Z'_s 为对侧系统阻抗和线路阻抗之和。

传统工频突变量方向元件判据见式(3)和式(4)。

正方向故障判据:

$$18^\circ \leq \arg(\Delta I_\theta / \Delta U_\theta) \leq 180^\circ \quad (3)$$

反方向故障判据:

$$-162^\circ \leq \arg(\Delta I_\theta / \Delta U_\theta) \leq 0^\circ \quad (4)$$

其中, $\theta = A, B, C$; ΔI_θ 和 ΔU_θ 分别为保护安装处(即母线处) θ 相工频突变量电压、电流值。

图1中,仅 k_1 发生故障时,保护装置1、2、3、4判断的故障方向分别为正、反、正、正;当发生功率倒向时保护装置1、2、3、4判断的故障方向分别为反、正、反、正。通常纵联方向保护启动后需要延迟一段时间(一般约为 $15\ \text{ms}$)判断是否接收到对侧的闭锁信号。保护判别时序见图3。图中, t_1 为交流故障发生时刻; t_2 为功率倒向发生时刻; t_3 为保护的整定计算时间(一般是1个工频周期); t_4 为保护的延迟时间。

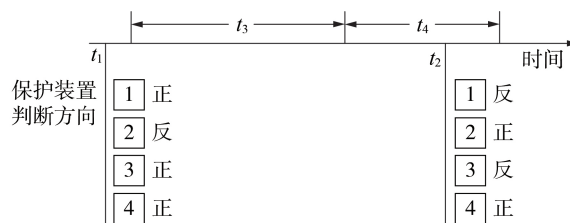


图3 保护判别时序图

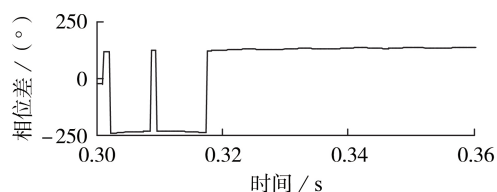
Fig.3 Protection discrimination timing diagram

由第1节分析可知 t_1 、 t_2 间的间隔为 $20 \sim 30\ \text{ms}$,小于 t_3 和 t_4 的时间总和,因此交流系统会在保护延迟期间发生功率倒向。发生功率倒向时保护装置1、2、3的判断方向由正、反、正变为反、正、反。在保护装置2的判断方向由反方向变为正方向时,其由发送闭锁信息变为保护启动,保护装置1返回并向保护装置2发闭锁信息,若保护装置2的动作速度较快可能发生误动,如图4(a)所示;保护装置3的判断方向由正方向变为反方向时返回并发闭锁信息,因此可能会拒动,如图4(b)所示。

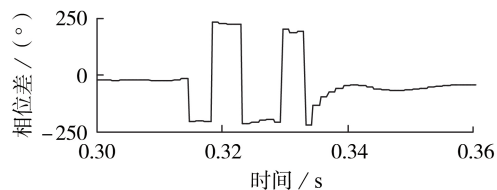
由于直流侧逆变站发生换相失败和交流发生功率倒向的影响,传统工频突变量方向元件在交直流混联系统中的适应性存在问题,保护装置2、3的故障方向判别结果会发生改变,导致其发生误动。

2.2 交直流混联系统频率偏移分析

直流系统一般采用定电流控制或定功率控制,本文所搭建的模型为定电流控制。对逆变侧的交流系统而言,直流系统可以等效为一个受换流母线电压控制的可控电流源^[16],当受到扰动或发生故障时,直流系统利用控制系统对电流进行调节,尽量使其稳定在设定值。 $0.3\ \text{s}$ 发生交流侧金属性接地故障、持续时间为 $0.1\ \text{s}$ 时,电压、电流波形如图5所示。



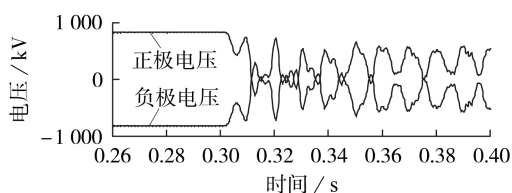
(a) 保护装置 2



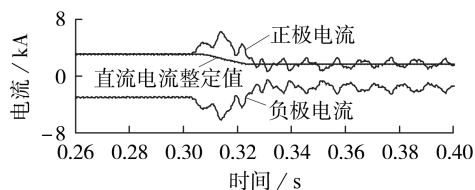
(b) 保护装置 3

图 4 发生功率倒向时保护装置 2、3 动作特性

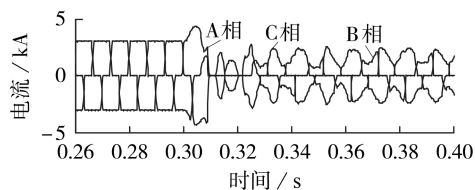
Fig.4 Operation characteristics of protection device No.2 and No.3 when power is reversed



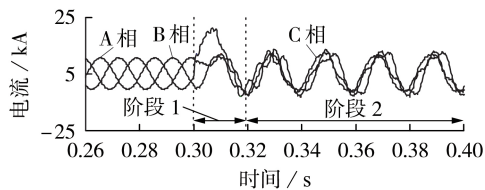
(a) 直流电压



(b) 直流侧电流



(c) 逆变侧换流变压器阀侧电流



(d) 交流侧故障电流

图 5 交流、直流侧电流和电压波形

Fig.5 Waveforms of AC and DC side current and voltage

直流电压在受到交流故障扰动后降低(如图 5(a)所示),故障初期直流电流和逆变侧换流变压器阀侧电流(如图 5(b)、(c)所示)增大,然后发生换相失败,如图 2(a)中 γ_1 所示。由于直流电压的降低,低压限流控制器通过定电流控制器调节直流电流大小。受直流控制系统的影响,阀侧电流呈现变化的电气

特征,在 0.309 5~0.311 8 s 和 0.32~0.321 5 s 期间出现阀侧电流短时为 0 的情况,如图 5(c)所示。因此直流系统受到扰动时对外表现为一个变化电流源^[16]。根据图 5(d),交流侧故障电流特征可分为 2 个阶段。

(1)阶段 1:故障电流受直流控制系统的影响产生较大波动。

(2)阶段 2:由于直流控制系统的作用导致三相故障电流相位差发生变化。

由这 2 个阶段可见,受直流控制系统的影响,交流侧故障电流发生变异。

发生单相接地故障时,故障电流频谱如图 6 所示。图中, R_g 为过渡电阻。由图 6 可见,交流线路发生金属性和经 10 Ω 过渡电阻接地故障时,由于交流侧电压跌落较大,不能给予逆变侧足够的换相电压,因此会引起逆变侧发生换相失败,同时交流故障电流主频率发生偏移;发生经 50 Ω 和 100 Ω 过渡电阻接地故障时,交流侧电压跌落较小,直流侧没有发生换相失败。

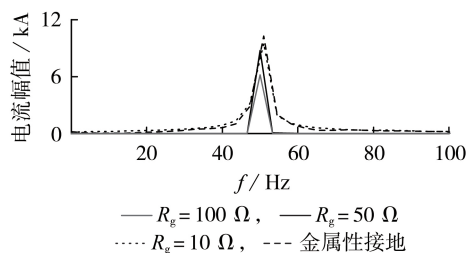


图 6 发生单相接地故障时故障电流频谱

Fig.6 Fault current spectrum of single-phase grounding fault

工频突变量方向元件是在工频量的基础上进行保护计算的,由于交流侧故障电流会出现频率偏移的暂态特征,这就降低了傅里叶提取工频量的准确性。同时,功率倒向也会影响方向元件对故障方向的判别。

3 基于补偿电压突变量的本地信息判据方法

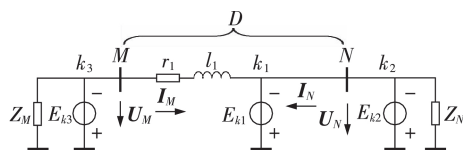
3.1 保护原理及动作流程

故障分量由故障点假想电源产生,仅在故障时出现,正常时刻为 0^[17]。图 7 为不同故障点发生故障时的电压故障分量。图中,点 k_1 为正向区内故障点;点 k_2 为正向区外故障点;点 k_3 为反向区外故障点; E_{k1} 、 E_{k2} 、 E_{k3} 分别为故障点 k_1 、 k_2 、 k_3 的假想电源; M 、 N 侧为保护装置安装位置; ΔU_M 、 ΔI_M 和 ΔU_N 、 ΔI_N 分别为 M 侧和 N 侧保护安装处(即母线处)测量电压、电流突变量。故障分量网络中故障点电压最高,整定点理论上可选为保护线路末端至对侧系统等值阻抗末端的任意一点^[3]。对于 M 侧保护,其保护末端为线路终点 N ;对于 N 侧保护,其保护末端为 M 。保护安装处测量突变量电流 ΔI_j 、电压 ΔU_j 在整定阻抗 Z_{set}

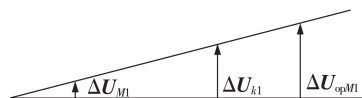
上的压降之差即为补偿电压突变量,即有:

$$\Delta U_{opj} = \Delta U_j - \Delta I_j Z_{set} \quad j=M, N \quad (5)$$

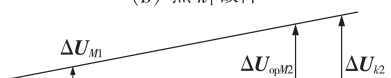
其中, ΔU_{opj} 为 j 侧补偿电压突变量; ΔI_j 、 ΔU_j 分别为 j 侧安装处测量的电流、电压突变量; Z_{set} 为整定阻抗。



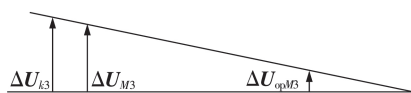
(a) 故障分量网络



(b) 点 k_1 故障



(c) 点 k_2 故障



(d) 点 k_3 故障

图7 不同点发生故障时电压故障分量图

Fig.7 Voltage fault component under faults at different points

以正向区内故障点 k_1 、正向区外故障点 k_2 、反向区外故障点 k_3 发生故障这3种情况分析故障后母线电压突变量、故障点电压突变量、补偿电压突变量的幅值之间的关系。 ΔU_{opMi} 、 ΔU_{ki} 、 ΔU_{Mi} 分别为点 k_i 发生故障时, M 侧补偿电压突变量、故障点 k_i 电压突变量、 M 侧保护安装处测量电压突变量; Z_M 为 M 侧保护安装处背侧系统阻抗; Z_{ki} 为点 k_i 发生故障时故障点到 M 侧的短路阻抗; Z_N 为 M 侧对侧系统阻抗和线路阻抗之和; $i=1, 2, 3$ 。

当点 k_1 发生故障时, 对 M 侧有:

$$\Delta U_{M1} = -Z_M \Delta I_{M1} \quad (6)$$

$$\Delta U_{opM1} = \Delta U_{M1} - \Delta I_{M1} Z_{set} = -(Z_M + Z_{set}) \Delta I_{M1} \quad (7)$$

$$\Delta U_{k1} = \Delta U_{M1} - \Delta I_{M1} Z_{k1} = -(Z_M + Z_{k1}) \Delta I_{M1} \quad (8)$$

因为 $Z_{k1} < Z_{set}$, 所以 $|\Delta U_{opM1}| > |\Delta U_{k1}| > |\Delta U_{M1}|$, 如图7(b)所示。

当点 k_2 发生故障时, 对 M 侧有:

$$\Delta U_{M2} = -Z_M \Delta I_{M2} \quad (9)$$

$$\Delta U_{opM2} = -(Z_M + Z_{set}) \Delta I_{M2} \quad (10)$$

$$\Delta U_{k2} = -(Z_M + Z_{k2}) \Delta I_{M2} \quad (11)$$

因为 $Z_{k2} > Z_{set}$, 所以 $|\Delta U_{k2}| > |\Delta U_{opM2}| > |\Delta U_{M2}|$, 如图7(c)所示。

当点 k_3 发生故障时, 对 M 侧有:

$$\Delta U_{M3} = -(Z_N + Z_{set}) \Delta I_{M3} \quad (12)$$

$$\Delta U_{opM3} = Z_N \Delta I_{M3} \quad (13)$$

$$\Delta U_{k3} = (Z_N + Z_{set} + Z_{k3}) \Delta I_{M3} \quad (14)$$

显然 $|\Delta U_{k3}| > |\Delta U_{M3}| > |\Delta U_{opM3}|$, 如图7(d)所示。

由于篇幅关系, 本文只列出 M 侧补偿电压突变量、故障点电压突变量和母线电压突变量的关系, N 侧情况的分析与 M 侧类似。

综上所述, 各个故障点发生故障时 ΔU_{Mi} 、 ΔU_{opi} 、 ΔU_{ki} ($i=1, 2, 3; j=M, N$) 的关系如表1所示。

表1 各故障点电压故障分量幅值间的关系

Table 1 Relationship between amplitudes of voltage fault components at each fault point

故障点	电压故障分量幅值间的关系
k_1	$ \Delta U_{op1} > \Delta U_{k1} , \Delta U_{op1} > \Delta U_{M1} $
k_2	$ \Delta U_{op2} > \Delta U_{M2} , \Delta U_{op2} < \Delta U_{k2} $
k_3	$ \Delta U_{op3} < \Delta U_{k3} , \Delta U_{op3} < \Delta U_{M3} $

当图1中的线路 TY 段上的点 k_1 发生故障时, 母线电压突变量、故障点电压突变量、补偿电压突变量的幅值、故障电流方向的关系如表2所示。发生功率倒向情况时母线电压突变量、故障点电压突变量、补偿电压突变量的幅值、故障电流方向关系如表3所示。表中, ΔU_{opi} 、 ΔU_i 和 I_i 分别为保护装置 i ($i=1, 2, 3, 4$) 侧所对应的补偿电压突变量、保护安装处测量电压和电流突变量, 规定故障电流从母线流向线路为正, $I_i > 0$ 表示电流为正方向, $I_i < 0$ 表示电流为反方向。

表2 仅点 k_1 发生故障时各电压故障分量幅值间的关系

Table 2 Relationship between magnitudes of voltage fault components when failure only occurs at point k_1

保护装置	电压故障分量幅值间的关系	故障电流方向
1	$ \Delta U_{op1} < \Delta U_{k1} , \Delta U_{op1} > \Delta U_{M1} $	$I_1 > 0$
2	$ \Delta U_{op2} < \Delta U_{k1} , \Delta U_{op2} < \Delta U_{M2} $	$I_2 < 0$
3	$ \Delta U_{op3} > \Delta U_{k1} , \Delta U_{op3} > \Delta U_{M3} $	$I_3 > 0$
4	$ \Delta U_{op4} > \Delta U_{k1} , \Delta U_{op4} > \Delta U_{M4} $	$I_4 > 0$

表3 功率倒向时各电压故障分量幅值间的关系

Table 3 Relationship between magnitudes of voltage fault components when power is reversed

保护装置	电压故障分量幅值间的关系	故障电流方向
1	$ \Delta U_{op1} < \Delta U_{k2} , \Delta U_{op1} < \Delta U_{M1} $	$I_1 < 0$
2	$ \Delta U_{op2} < \Delta U_{k2} , \Delta U_{op2} > \Delta U_{M2} $	$I_2 > 0$
3	$ \Delta U_{op3} < \Delta U_{k2} , \Delta U_{op3} < \Delta U_{M3} $	$I_3 < 0$
4	$ \Delta U_{op4} < \Delta U_{k2} , \Delta U_{op4} > \Delta U_{M4} $	$I_4 > 0$

由表2、3可以看出仅发生区内故障时才会同时满足这3个条件: ① $|\Delta U_{opi}| > |\Delta U_{ki}|$; ② $|\Delta U_{opi}| > |\Delta U_{Mi}|$;

③ $I_i > 0$ 。其中, ΔU_k 为故障点突变量。以图1所示故障说明保护工作流程, 当仅点 k_i 发生短路故障时, 保护装置1—4判断是否同时满足条件①—③, 此时只有保护装置3、4满足并启动, 装置1、2不启动。启动后的保护装置再判断是否满足条件④ ($|\Delta U_{opi}| - |\Delta U_i|)/I_i > 0$, 若装置同时满足条件①—④, 则证明是区内故障, 保护动作。若发生功率倒向, 则启动的保护装置3、4仍然满足条件④, 可以正确动作。

同时满足条件①—③的保护装置所对应的线路为故障线路, 并且非故障线路保护装置不会同时满足这3种条件, 不会出现保护装置启动的情况, 因此不必像传统纵联方向保护装置一样发送闭锁信号。因此, 本文方法的优势在于不需要通信设备的参与, 仅靠装置在本地判断是否同时满足3个启动条件进而判断是否启动即可, 省去了信号传递的时间, 从而可以提高保护动作速度。

故障点 k 短路之前的电压若用 $U_{k|0}$ 表示, 则短路后故障点附加电压 $\Delta U_k = -U_{k|0}$ 。考虑到故障点电压较难获得, 可以用短路前保护末端的记忆电压 U_N 来代替 M 侧故障电压。由于在电力系统正常运行时系统各点电压有效值相差不大, 所以用 U_N 代替 ΔU_k 带来的误差较小, 对可靠性、灵敏度以及保护范围影响也都较小^[18]。同理可用 U_M 代替 N 侧故障电压。

3.2 连锁故障及保护动作时序分析

当交流侧发生严重故障时将引起交直流系统的连锁故障, 整个过程可分为以下5个阶段。

(1) 阶段1: 交流侧故障未引起逆变侧换相失败, 此时保护判据能正确判断故障方向, 满足启动条件和动作条件。

(2) 阶段2: 交流故障引发换相失败, 此时交流侧和直流侧处于故障“竞争”状态, 由图2可以看出, 在直流侧发生换相失败10 ms后发生功率倒向, 即在换相失败发生后功率倒向发生前, 功率仍然是流向交流侧的, 即此时交流系统强于直流系统, 以交流故障为主, 此时保护满足启动条件和动作条件。

(3) 阶段3: 此时已经发生功率倒向, 由于保护在阶段1、2满足启动条件已经启动, 在发生功率倒向后满足动作条件④, 因此保护可以正常动作, 切除故障线路。

(4) 阶段4: 直流系统恢复, 在此过程中交流侧故障点和直流系统恢复为相互加强故障性质关系, 此时保护能正确判断^[6]。

(5) 阶段5: 故障切除, 此时保护装置能正确判断。

3.3 过渡电阻对保护的影响

正方向点 k_i 发生故障时, $|\Delta U_M|$ 、 $|\Delta U_{opM}|$ 分别如式(6)和式(7)所示, 过渡电阻只会影响 ΔI_M 、 ΔU_M 的

大小, 则始终有:

$$|\Delta U_{opM}| - |\Delta U_M| = |\Delta I_M Z_{set}| > 0 \quad (15)$$

正方向点 k_i 发生故障时, $|\Delta U_k|$ 如式(16)所示。

$$|\Delta U_k| = |(Z_M + Z_k) \Delta I_M + C \Delta I R_g| = |(Z_M + Z_A) \Delta I_M| \quad (16)$$

其中, $C = (\Delta I_M + \Delta I_N) / \Delta I_M$; $Z_A = Z_k + C R_g$ 。

假设 $|\Delta U_{opM}| > |\Delta U_k|$, 则 $|Z_M + Z_{set}| > |Z_M + Z_A|$, 附录A中图A1所示的动作特性中, 弧线是以 $-Z_M$ 顶点为圆心、 $Z_M + Z_{set}$ 为半径的圆, 发生正向故障时, $Z_M + Z_{set}$ 很大, 保护有很强的抗过渡电阻能力, 只有在保护范围末端经大电阻接地情况下过渡电阻的影响较大, 对于保护出口处故障也有很好的动作特性。由于过渡电阻呈阻性, ΔI_M 和 ΔI_N 一般同相位, 故不存在对侧电流助增导致的稳态超越的问题^[19]。

发生反向故障时的 $|\Delta U_M|$ 和 $|\Delta U_{opM}|$ 分别如式(12)和式(13)所示, 此时始终有:

$$|\Delta U_{opM}| - |\Delta U_M| = -|\Delta I_M Z_{set}| < 0 \quad (17)$$

此时的 $|\Delta U_k|$ 如式(18)所示。

$$|\Delta U_k| = |(Z_N + Z_{set} + Z_k + C R_g) \Delta I_M| \quad (18)$$

显然有 $|\Delta U_k| > |\Delta U_{opM}|$, 故保护不受过渡电阻的影响。

综上所述, 基于补偿电压判别方向的保护在很大程度上不受过渡电阻的影响。

3.4 傅氏级数受频率偏移的误差补偿

由于交直流混联系统逆变侧发生换相失败时, 会出现交流故障电流频率偏移的现象, 导致基于工频量的保护出现计算误差, 因此本文对频率进行误差补偿。

设额定频率为 f_n , 则幅值为 A_m 、初相位为 φ 的信号如式(19)所示。

$$A(t) = A_m \cos(2\pi f t + \varphi) = A_m \cos \varphi \sin(2\pi f t) + A_m \sin \varphi \cos(2\pi f t) = a \sin(2\pi f t) + b \cos(2\pi f t) \quad (19)$$

其中, f 为实际频率, 可能不等于额定频率; a 、 b 分别为信号的实部和虚部。

显然实部 a 和虚部 b 有式(20)成立。

$$\begin{cases} a = A_m \cos \varphi \\ b = A_m \sin \varphi \end{cases} \quad (20)$$

根据傅里叶算法可算出相应的实部 a_1 和虚部 b_1 为:

$$a_1 = \frac{2}{T_n} \int_0^{T_n} A(t) \sin(2\pi f_n t) dt =$$

$$\frac{2f_n^2}{\pi(f^2 - f_n^2)} \left[A_m \cos \left(\pi \frac{f - f_n}{f_n} + \varphi \right) \right] \sin \left(\pi \frac{f - f_n}{f_n} \right) \quad (21)$$

$$b_1 = \frac{2}{T_n} \int_0^{T_n} A(t) \cos(2\pi f_n t) dt = \frac{2f_n f}{\pi(f^2 - f_n^2)} \left[A_m \sin\left(\pi \frac{f - f_n}{f_n} + \varphi\right) \right] \sin\left(\pi \frac{f - f_n}{f_n}\right) \quad (22)$$

其中, $T_n = 1/f_n$ 。

由式(20)~(22)可得实、虚部的误差分别为:

$$\frac{|a_1|}{|a|} = \frac{2f_n^2}{\pi(f^2 - f_n^2)} \sin\left(\pi \frac{f - f_n}{f_n}\right) \quad (23)$$

$$\frac{|b_1|}{|b|} = \frac{2f_n f}{\pi(f^2 - f_n^2)} \sin\left(\pi \frac{f - f_n}{f_n}\right) \quad (24)$$

通常自动化装置及保护装置可以测量出系统的实时频率^[20],故由式(23)和式(24)可求出 $|a|$ 和 $|b|$ 。将式(22)除以式(21)可得:

$$\frac{b_1}{a_1} = \tan\left(\pi \frac{f - f_n}{f_n} + \varphi\right) \frac{f}{f_n} \quad (25)$$

进而可以求出修正过的 φ 。

本文提出的基于补偿电压突变量的本地信息判据有较好的抗过渡电阻能力,能很好地适应交直流混联系统的复杂工况,无论是否发生功率倒向都能保证保护正确动作;利用本地信息进行保护计算,不需要通信设备的参与,省去了信息传递和接受判断的时间,可提高保护的動作速度;利用频率误差补偿算法对相位和幅值进行修正,不受频率偏移的影响。

4 仿真验证

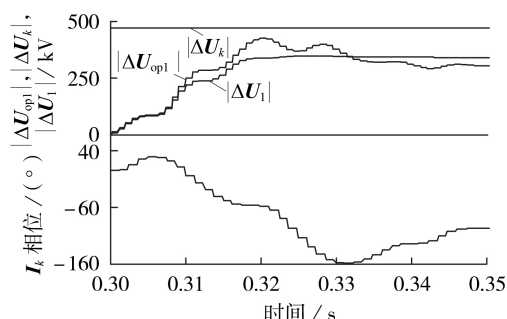
利用PSCAD搭建图1中的交直流混联系统模型进行仿真验证,直流系统电压为 ± 800 kV,换流母线电压为500 kV;线路NT的长度为40 km,线路TY的长度为100 km。线路单位正序线路电阻、电抗、电容分别为 $r_1=0.018 \Omega/\text{km}$ 、 $x_1=0.277 \Omega/\text{km}$ 、 $c_1=0.013 \mu\text{F}/\text{km}$,线路单位零序线路电阻、电抗、电容分别为 $r_0=0.231 \Omega/\text{km}$ 、 $x_0=0.973 \Omega/\text{km}$ 、 $c_0=0.008 \mu\text{F}/\text{km}$;500 kV系统侧的正序阻抗以及零序阻抗分别为 $4.37+j57.18 \Omega$ 、 $3.10+j20.45 \Omega$ 。文献[6]指出功率倒向受故障点到逆变电站物理距离和电气距离的影响,因此为了使交流系统发生功率倒向,在母线T出口10 km处设置故障点。在 $t=0.3$ s设置金属性接地故障和经50 Ω 过渡电阻单相接地故障,故障持续时间为0.1 s,采用截止频率为300 Hz的低通滤波器进行滤波,采样频率为1.2 kHz。

4.1 金属性接地故障仿真验证

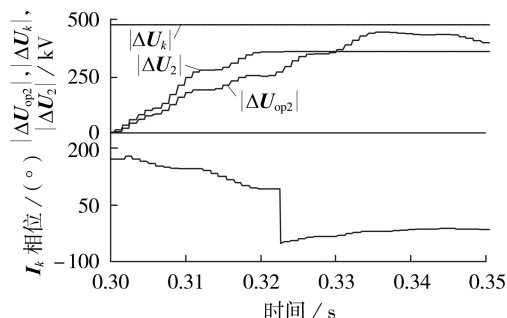
发生金属性接地故障时的交流侧电流和直流整流侧电压、电流如图5所示。交流侧故障电压见附录B中图B1,由图可知交流侧故障电压与纯交流系统相差不大,而交流侧故障电流与纯交流系统有较

大的差异,这主要是因为直流控制系统主要影响交流侧的电流,而对电压的影响较小。

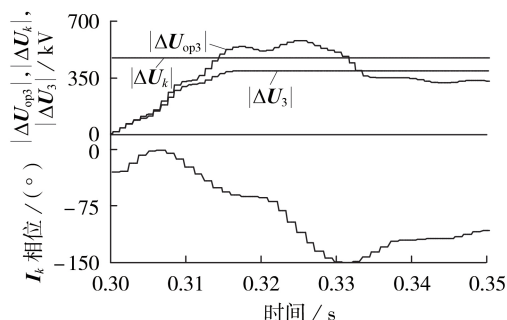
根据第1节分析可知,发生金属性接地故障时交直流系统发生连锁故障,交流系统线路发生功率倒向,如图2所示,交流系统在故障发生后前20 ms内没有出现功率倒向。发生金属性接地故障时各保护装置的動作情况如图8所示。由图可见在交流故



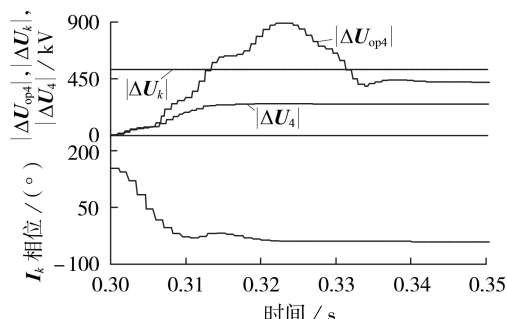
(a) 保护装置 1



(b) 保护装置 2



(c) 保护装置 3



(d) 保护装置 4

图8 发生金属性接地故障时各保护装置的動作情况

Fig.8 Operation of each protection device under metal grounding faults

障发生后功率倒向发生前,保护装置3、4满足动作条件① $|\Delta U_{opi}| > |\Delta U_k|$ 、② $|\Delta U_{opi}| > |\Delta U_i|$ 、③ $I_i > 0$ 时保护启动,同时满足条件④ $(|\Delta U_{opi}| - |\Delta U_i|)/I_i > 0$ 时保护动作。当发生功率倒向后保护装置3、4仍然满足动作条件,可以动作,而保护装置1、2始终不满足启动条件,故不动作。

4.2 经 50 Ω 接地故障仿真验证

由于经 50 Ω 过渡电阻单相接地故障时直流逆变侧没有发生换相失败和功率倒向,各保护装置的动作情况如图9所示。由图9可见,保护装置3、4从故障发生一直满足启动条件和动作条件,而保护装置1、2不满足启动条件。

4.3 线路参数变化对保护灵敏度影响仿真验证

考虑到系统运行时线路的参数受到沿线气候、大地电阻率分布不均匀等因素的影响而变化,如温度变化 10 $^{\circ}\text{C}$ 、线路电阻发生 4% 的变化^[21]。仿真线路参数变化 $\pm 10\%$ 时金属性接地故障时保护原理的适应性,结果如附录 B 中的图 B2、B3 所示。

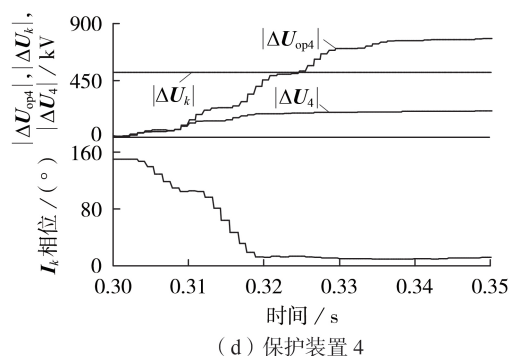


图9 发生经 50 Ω 接地故障时各保护装置的动作情况

Fig.9 Operation of each protection device under grounding fault with 50 Ω transition resistance

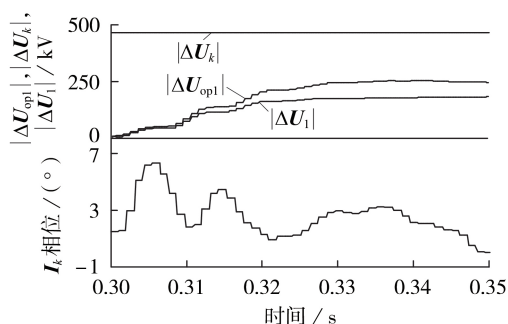
线路参数变化 $\pm 10\%$ 区内故障信息图见附录 B 中的图 B4,可以看出在线路参数变化 $\pm 10\%$ 发生金属性接地故障时,直流逆变侧发生换相失败和功率倒向。则由图 B2、B3 可以看出保护装置3、4能够满足启动和动作条件,保护装置1、2不会出现误动的情况。因此本文提出的保护判据不受线路参数变化的影响,有较好的适应性。

由仿真结果可见,基于补偿电压突变量构成的方向判据能够适应交直流混联系统的复杂暂态工况,且不受交流线路功率倒向的影响,可以确保保护装置的正确动作,并同样适用于不发生功率倒向的线路。当线路参数发生变化时,保护能够正常动作,有较好的适应性。另外,本文保护不需要配置通信系统,仅需两侧装置判断本地信息是否满足启动、动作条件即可,省去了传统方向保护在交流线路发生功率倒向时需要通信传递闭锁信息的步骤。

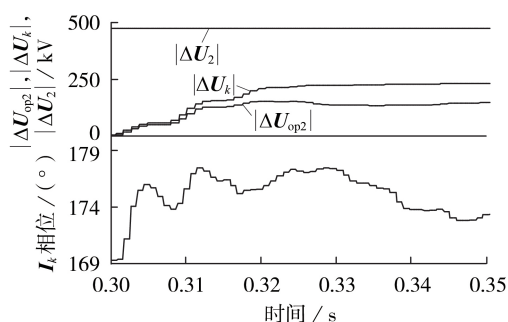
5 结论

本文充分利用了正、反方向故障后母线电压突变量、故障点电压突变量、补偿电压突变量幅值之间的关系构成基于补偿电压突变量的本地信息判据。通过对该判据的理论研究以及仿真分析,得出如下结论:

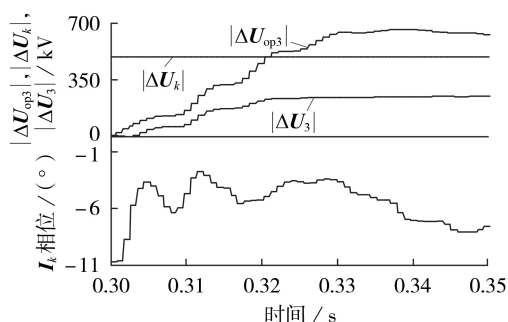
- (1) 发生区内、外故障后,母线电压突变量、故障点电压突变量、补偿电压突变量的幅值关系大小较为明确,适宜构成方向元件的判据;
- (2) 该保护方案能够克服交直流混联系统连锁故障引发功率倒向的影响,并且线路参数发生变化和经过渡电阻接地故障时,保护能够正常动作,有较好的适应性;
- (3) 该保护不需要配置通信系统,减少了通信传输和接收的时间,可以提高保护动作的速度;
- (4) 该保护方案在理论上同样适用于传统简单交流系统。



(a) 保护装置 1



(b) 保护装置 2



(c) 保护装置 3

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杨欢欢,蔡泽祥,朱林,等. 直流系统无功动态特性及其对受端电网暂态电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 86-92.
YANG Huanhuan, CAI Zexiang, ZHU Lin, et al. Dynamic characteristic of HVDC reactive power and its influence on transient voltage stability of receiving-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 86-92.
- [2] CHEN Wei, MALIK O P, YIN Xianggen, et al. Study of wavelet-based ultra high speed directional transmission line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 2234-1139.
- [3] 陈卫,尹项根,陈德树,等. 基于补偿电压的突变量方向判别原理[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(14): 49-51, 66.
CHEN Wei, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. The ultra high-speed directional protective relaying based on fault component of compensation voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(14): 49-51, 66.
- [4] 陈卫,尹项根,陈德树,等. 基于补偿电压故障分量的纵联方向保护原理与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 95-100.
CHEN Wei, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Principle investigation and simulation of directional protection based on fault component of compensating voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 95-100.
- [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 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.
- [6] 李晓华,蔡泽祥,黄明辉,等. 交直流电网故障暂态功率倒向解析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 61-66, 85.
LI Xiaohua, CAI Zexiang, HUANG Minghui, et al. Transient power converse in an AC/DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 61-66, 85.
- [7] 蔡泽祥,李佳曼,余超耘,等. 直流扰动对交流继电保护动态行为的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3246-3252.
CAI Zexiang, LI Jiaman, YU Chaoyun, et al. Impact of DC disturbances on AC protective relaying dynamic behavior[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3246-3252.
- [8] HE Jian, TANG Yong, ZHANG Jian, et al. Fast calculation of power oscillation peak value on AC tie-line after HVDC commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2194-9195.
- [9] 刘可真,梁松涛,束洪春,等. 过渡电阻对特高压交直流混联电网暂态功率倒向的影响分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1257-1261.
LIU Kezhen, LIANG Songtao, SHU Hongchun, et al. Influence of transition resistance on transient power converse in UHV AC/DC hybrid power system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1257-1261.
- [10] 潘尔生,李军,申洪明,等. 直流换相失败引发功率倒向保护策略研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 40-47.
PAN Ersheng, LI Jun, SHEN Hongming, et al. Study on strategy to avoid converse during commutation failure[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44(5): 40-47.
- [11] 邵震,王炳炎. 直流输电换相失败对交流侧继电保护的影响[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 42-45.
SHAO Zhen, WANG Bingyan. Analysis on influence of HVDC commutation failure on AC relay protection[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 42-45.
- [12] 杨光亮,邵能灵,郑晓冬,等. 多馈入高压直流输电系统中功率倒向问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 22-27.
YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Power converse in multi-feed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 22-27.
- [13] 刘强,蔡泽祥,刘为雄,等. 交直流互联电网暂态功率倒向及对继电保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 34-38.
LIU Qiang, CAI Zexiang, LIU Weixiong, et al. Transient power converse in AC/DC interconnected power grid and its influence on protection relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 34-38.
- [14] 刘之尧,唐卓尧,张文峰,等. 直流换相失败引起继电保护误动作分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 104-107.
LIU Zhiyao, TANG Zhuoyao, ZHANG Wenfeng, et al. Misoperation analysis of relay protection caused by DC phase change failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 104-107.
- [15] 侯俊杰,樊艳芳,晁勤,等. 基于时域全量故障模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 89-96.
HOU Junjie, FAN Yanfang, CHAO Qin, et al. Cluster wind power outgoing line pilot protection scheme based on time-domain full-frequency fault model correlation identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 89-96.
- [16] 张文峰. 交直流互联受端电网故障特征变异分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 91-95.
- [17] 中国电力科学研究院. 特高压输电技术. 直流输电分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 91-103.
- [18] 樊艳芳,侯俊杰,晁勤,等. 一种抗暂态超越的集群风电送出线时域方程模型误差修正距离保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 10-18.
FAN Yanfang, HOU Junjie, CHAO Qin, et al. Time-domain equation model deviation correction distance protection for cluster wind power transmission line with anti-transient ability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 10-18.
- [19] 张保会. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 129-136.
- [20] 袁石良,董杰,徐志强,等. 基于频率测量值的相量及电气量的DFT修正算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 122-127.
YUAN Shiliang, DONG Jie, XU Zhiqiang, et al. A correction DFT algorithm of phasor and electric parameters based on frequency measurement[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 122-127.
- [21] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 25-31.

作者简介:



罗瑞

罗瑞(1995—),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 1359224309@qq.com);

樊艳芳(1971—),女,新疆乌鲁木齐人,副教授,硕士,主要从事新能源并网技术及电力系统保护与控制研究(E-mail: 410849062@qq.com)。

(编辑 任思思)

Directional protection strategy of power inversion caused by chain fault of AC/DC hybrid system

LUO Rui, FAN Yanfang

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

Abstract: Aiming at the adaptability problem of directional pilot protection under power inversion caused by the chain faults in AC/DC hybrid system, taking the single-phase grounding fault with high incidence of AC lines as an example, based on the analysis of the influence of the transition resistance on power inversion and frequency offset of the fault current, a local information criterion method based on compensating voltage mutation is proposed according to the relationship among the bus voltage mutation, fault point voltage mutation and compensation voltage mutation. The proposed method can distinguish internal and external faults only by the local fault information without the participation of communication equipment. It is not affected by the power inversion of the AC/DC hybrid system and can modify the fault current by frequency correction algorithm. The validity of the proposed method is verified by the modeling simulation in PSCAD software.

Key words: AC/DC hybrid; chain fault; power inversion; compensating voltage; local information tuning calculation; frequency offset correction

(上接第 182 页 continued from page 182)

XIE Shiwei, HU Zhijian, NING Yue. Multi-objective hierarchical stochastic chance-constrained programming considering optimal load-shedding direction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 35-42, 51.

作者简介:

杨 阳(1994—),女,安徽滁州人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为负荷优化调度(E-mail: yangyang9296@163.com);



杨 阳

徐青山(1979—),男,江苏泰州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为新能源发电、负荷资源优化调度以及智能配电网运行与规划(E-mail: xuqingshan@seu.edu.cn);

戴蔚莺(1995—),女,江苏南京人,博士研究生,主要从事智能电网调度以及需求侧管理方面的研究工作(E-mail: daiweiying@seu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Bi-level optimal dispatch strategy of air-conditioning load with minimum reduction and minimum start-stop number as characteristics

YANG Yang¹, XU Qingshan¹, DAI Weiying¹, LUAN Kaining², YANG Bin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to maintain the stable operation of power grid, save dispatch cost and improve users' comfort, a bi-level optimal dispatch strategy with minimum reduction and minimum start-stop number as characteristics is proposed in the optimal dispatch of air-conditioning load. Along the optimal direction of load reduction, the optimal combination of air-conditioning load reduction in space is realized with the minimum air-conditioning reduction as its objective. For the multiple air-conditioners at each control node, their requirements of control accuracy are met through safety switch and temperature control strategy with the minimum start-stop number as the goal. The proposed bi-level optimal strategy not only ensures the stability of power grid, but also effectively reduces the reduction of air-conditioning, and at the same time, ensures the control accuracy, maximizes the users' comfort and reduces the dispatch cost. Simulative results of IEEE 33-bus distribution network verify the feasibility and accuracy of the proposed dispatch strategy.

Key words: air-conditioning load; minimum reduction; switch control; temperature control; bi-level optimization; dispatch strategy

附录 A

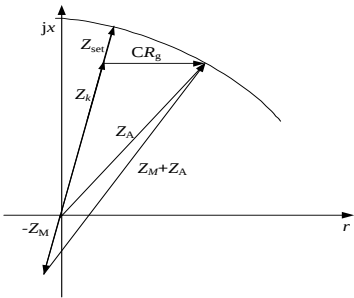


图 A1 动作特性

Fig.A1 Action characteristics

附录 B

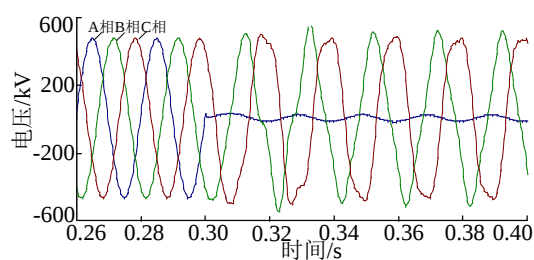
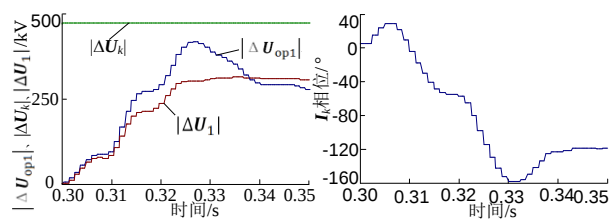
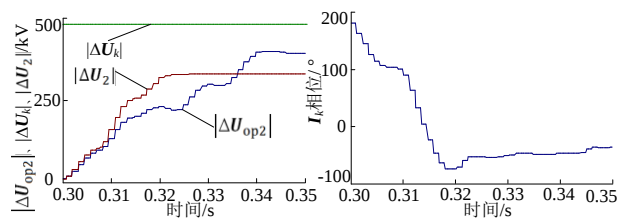


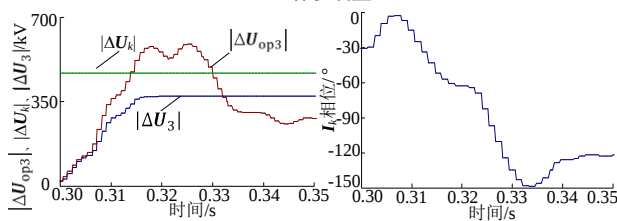
图 B1 交流侧故障电压
Fig.B1 Fault voltage of AC side



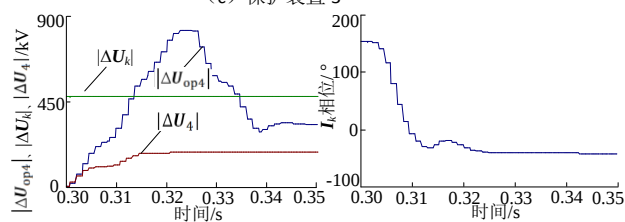
(a) 保护装置 1



(b) 保护装置 2



(c) 保护装置 3



(d) 保护装置 4

图 B2 线路参数增大 10%后发生金属性接地故障时各保护装置动作情况

Fig.B2 Operation of protection device during metal grounding when line parameters are increased by 10%

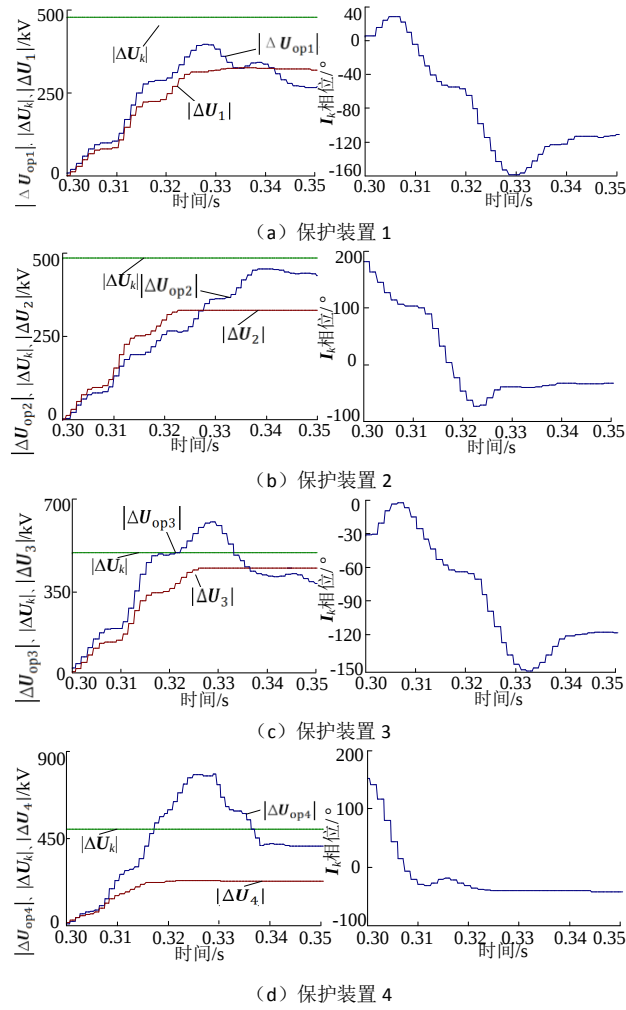


图 B3 线路参数减小 10%后发生金属性接地故障时各保护装置动作情况

Fig.B3 Operation of protection device during metal grounding when line parameters are decreased by 10%

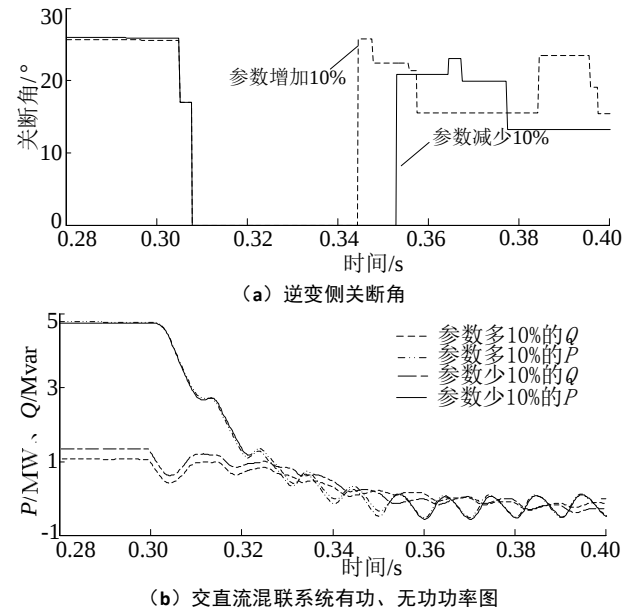


图 B4 线路参数变化±10%时区内故障信息图

Fig.B4 Information of internal fault when line parameters change by ±10%