# 基于方向权重的广域后备保护跳闸策略

静1裴迅2马伟1王增平1 马

(1.华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206:2. 国网北京市供电公司 房山供电局,北京 102401)

摘要.在故障元件已被有限广域集中式后备保护识别的基础上.提出一种基于方向权重的广域保护跳闸策 略。根据网络拓扑及本区域内正序电流相量信息,构造基于方向权重的节点-支路关联矩阵,然后根据故障判 别结果和断路器失灵判别结果构造元件-断路器关联度向量,并通过关联度向量识别并跳开关联断路器。仿 真结果表明,所提方法简化了后备保护的配合关系,且能够在最小范围内切除故障,对信息同步没有严格要 求,在断路器信息部分缺失时也有很好的适用性及可靠性。

关键词:继电保护:广域保护:跳闸策略:断路器:方向权重:元件-断路器关联度向量

中图分类号: TM 772

文献标识码:A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.016

# 0 引言

基于本地信息的后备保护因整定配合复杂、动 作时间长等问题,无法满足电网安全运行要求。随着 广域同步测量和数字化变电站技术的发展,利用多源 信息构成广域保护[1-4]为解决该问题提供了新思路。

目前,针对广域保护的研究主要集中在构成模 式[5-6]、故障识别[7-10]及跳闸策略[11]3个方面。构成模 式是实现广域保护功能的基础,故障识别是广域保 护的核心,跳闸策略是广域保护实现的保障,三者缺 一不可。现有研究多集中于故障识别、对跳闸策略的 研究相对较少。针对有限广域集中式系统结构,文 献[12]基于失灵保护提出了有限广域保护系统跳闸 策略,在主保护拒动后,避免了大范围切除故障而造 成巨额损失。针对分布式广域保护系统结构,文献 [13]提出了基于分布分散式的广域保护跳闸策略, 该方法通过采用拓扑树搜索的方法划定智能电子设 备(IED)的保护范围和信息交互范围,自适应调节 保护区域,实现 IED 动作时断路器跳闸。当某个 IED

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2014ZZD02), the National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB215200), the National Natural Science Foundation of China (51277193, 50-907021), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry ([2011] No.1139), Hebei Natural Science Foundation (E2012502034), Electric Power Youth Science and Technology Creativity Foundation of CSEE([2012]No.46), Beijing Support Program for Science and Technology Nova (Z141101001814012) and the Fund of Fok Ying Tung Foundation(141057)

的测量信息无法被其他关联 IED 获取时, 文献 [14] 指出,该 IED 所在的2个主保护区域形成后备保护 区域,当在后备保护区域内发生故障时首先断开信息 丢失的 IED 处的断路器,再根据主保护区域内其他 的 IED 电气量信息实现纵续跳闸。针对变电站集中 式广域保护系统结构,文献[15]在定位了故障元件 的基础上,提出了基于 Petri 网的断路器跳闸序列搜 索方法,能够满足变电站近远后备保护跳闸的要求, 且不受变电站接线形式和运行方式的影响。

对于有限广域集中式系统结构,文献[12]仅提 出了一种跳闸策略的思路,并没有研究具体的动作 策略。针对该问题,本文在故障元件已被有限广域 集中式后备保护16词识别的基础上,提出一种基于方 向权重的广域后备保护跳闸策略。首先根据网络拓 扑和本区域内开关的正序电流相量信息,形成基于 方向权重的节点-支路关联矩阵,然后根据故障判别 算法的判别结果和开关正序电流相量的监视结果, 构造元件-断路器关联度向量,并通过关联度向量识 别并跳开关联断路器。仿真结果表明,本方法简化 了后备保护配合关系,在各种情况下均可在最小范围 内切除故障,同时方法对信息同步要求不高,且具有 一定的容错性。

#### 基于方向权重的跳闸策略算法 1

# 1.1 基于方向权重的节点-支路关联矩阵

根据图论的拓扑理论,可将系统的接线形式抽 象为拓扑图 G=<V,E><sup>[17]</sup>。其中,顶点集 V 代表系 统内被保护的各类节点,包括发电机、母线、变压器 和输电线路:边集 E 代表各节点之间的直接连接状态, 直接相连表示为1,不直接相连表示为0。而在电力 系统中,各元件间通过开关元件联系,因此,边集E 亦可以用开关元件表示。定义电力网络节点-支路 关联矩阵A,元素 $A_{ii}$ 为:

收稿日期:2014-11-25;修回日期:2015-09-17

基金项目,中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014-ZZD02);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012-CB215200);国家自然科学基金资助项目(51277193,509070-21):教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留) [2011]1139号);河北自然科学基金资助项目(E2012502034); 中国电机工程学会电力青年科技创新项目(电机学[2012]46号); 北京市科技新星支持计划(Z141101001814012);霍英东教育 基金资助项目(141057)

		$A_{i}$	;=	$\begin{cases} 1\\ 0 \end{cases}$	)	节节	点点	i i	与与	开 开	关关	j i	直不	接 百	相接	连相	连			(1	)
	以	图	1	所	示	的	的形	t I	E P	西音	部:	, 某:	· 地	X	33	30	k١	7)	司	部⊨	包
为	为例,根据文献[18]有限广域集中式保护分区方																				
<b>,</b> í	导到	羽ろ	变日	包	站	$B_2$	为	Ét	ΞÌ	Ε,	其	保	护	I 🛛	貢	戊女	П [	Į.	1	中居	巨比
所	示	0	其	; ¢	1,	母	线	4	线	路	、迷	沂昆	なる	器	分	别	用	В	,Γ	ςQ	F
示,对应的节点-支路关联矩阵 A 为:																					
	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	]
	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	
	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
=	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
																				(2	()

其中,矩阵阶数为13×20;行分别对应变电站 B<sub>1</sub>—B<sub>3</sub>, 以及线路  $L_6$ — $L_{15}$ ;列分别对应断路器  $QF_{11}$ — $QF_{300}$  该 矩阵仅反映断路器和系统元件之间的连接关系,由 系统拓扑决定,与断路器状态无关。

考虑到开关状态的遥信量可能被错误识别。影 响拓扑分析的准确性,并对跳闸序列搜索的正确性 产生重要影响,因此,本文借助保护安装处正序电流

	0	0	0	-1	-1	0	-1	0	-1	0
	0	-1	0	0	0	-1	0	-1	0	0 -
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$A_{\rm f}=$	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

将修正正序电流列向量 [/表示为对角矩阵的形 式,即 $I_{D}$ =diag( $\alpha_{1}, \alpha_{2}, \cdots, \alpha_{19}, \alpha_{20}$ ),则基于方向权重 的节点-支路关联矩阵A,为:

$$\boldsymbol{A}_{t} = \boldsymbol{A}_{f} \boldsymbol{I}_{D} \tag{4}$$

其中,正负符号代表了流过断路器的电流与元件之 间的方向关系,正表示电流流入该元件,负表示电流 流出该元件:权重即模值体现了元件与各断路器之 间的电气关联程度,0元素表示该断路器与元件之

的相量信息识别拓扑(正序分量在网络正常运行和 发生各种类型的故障时均存在)。首先,由区域主机 获取本区域内各保护安装处正序电流相量信息 **a**,, 再根据节点-支路关联矩阵中断路器的排列顺序.形 成正序电流列向量 I。

对于信息缺失的断路器处正序电流相量 $\alpha_1$ 根 据基尔霍夫电流定律修正,其修正原则为:当某一断 路器处正序电流相量信息缺失时,取归属于同一变 电站内非故障母线的所有出线断路器的电流相量之 和的负值,或非故障线路对侧断路器的电流相量的 负值:当多出线节点缺失2个以上断路器处正序电 流相量信息(系统中故障以单重故障为主[16])时,首 先将非故障线路上断路器缺失的信息,取为对侧断 路器的正序电流的负值,然后利用基尔霍夫电流定 律对故障线路上断路器缺失的信息进行修正。以图 1 所示的系统中线路 L。发生故障为例,当变电站 B1 的断路器 QF15 和 QF17 的信息缺失时,首先将非故障 线路L<sub>8</sub>上的断路器QF<sub>15</sub>缺失的信息,取为对侧断路 器 OF16 处正序电流的负值:然后利用基尔霍夫电流 定律,可得故障线路 L,上的断路器 QF17 缺失的信息 为 QF14、QF15 及 QF19 处电流和的负值。

将修正后的电流列向量定义为修正正序电流列 向量 I', 即  $I' = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_{19}, \alpha_{20})^T$ 。规定电流方向 以流入元件为正,以流出元件方向为负,根据修正正 序电流列向量 [/ 将节点-支路关联矩阵表示为带方 向节点-支路关联矩阵A<sub>fo</sub>对于图1所示的系统,有:

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0		
0	-1	0	-1	0	0	-1	0	-1	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(3	;)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		

间无电气联系,非0元素代表对应断路器与元件之 间有电气联系。在跳闸策略中,方向用于识别断路 器与故障元件之间是否存在直接联系,权重用于判 断断路器的开关状态。

#### 1.2 广域保护跳闸策略算法

广域保护跳闸策略主要实现近后备保护、远后 备保护以及断路器失灵保护这 3 个基本功能[15]。以 图1所示的系统为例,假设各断路器均闭合,当线路

双

案

线

表

A



图 1 某地区 330 kV 电网局部 Fig.1 Partitial of a regional 330 kV power grid

L<sub>12</sub>故障时,由近后备保护跳开的断路器为直接相连 的断路器 QF<sub>23</sub>和 QF<sub>24</sub>;当断路器 QF<sub>23</sub>失灵时,由断 路器失灵保护跳开的断路器为其他连接在变电站 B<sub>2</sub> 出线上的断路器 QF<sub>12</sub>、QF<sub>16</sub>、QF<sub>18</sub>、QF<sub>21</sub>和 QF<sub>25</sub>;当线路 L<sub>12</sub>故障,且变电站 B<sub>3</sub>的直流电源消失时,由远后备 保护跳开的断路器为 B<sub>3</sub>出线对端的断路器 QF<sub>21</sub>、 QF<sub>23</sub>、QF<sub>28</sub>和 QF<sub>30</sub>。因此,为实现不同的保护功能,需 构造不同的跳闸策略。

#### 1.2.1 线路故障近后备跳闸策略算法

在保护区内发生故障时,首先由区域主机通过 保护算法确定故障元件,形成故障列向量 **D**。**D**中元 素的数目代表区域内保护元件的数目,排列顺序与 节点-支路关联矩阵中相同,元素 **D**;定义为:

$$D_{i} = \begin{cases} 1 & \overrightarrow{\pi} \stackrel{i}{\leftarrow} i \stackrel{k}{\leftarrow} \pm i \stackrel{k}{\leftarrow} \\ 0 & \overrightarrow{\pi} \stackrel{i}{\leftarrow} i \stackrel{k}{\leftarrow} \pm i \stackrel{k}{\leftarrow} \end{cases}$$
(5)

同时,定义近后备元件-断路器关联度向量T.:

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{c}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{t}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D} \tag{6}$$

 开关状态。

定义运算:**X**=[**Y**],其中**X**和**Y**均为1×n的列向 量,元素 X<sub>i</sub>为:

$$X_{i} = \begin{cases} 1 & |Y_{i}| > \delta \\ 0 & |Y_{i}| \le \delta \end{cases}$$
(7)

因此,线路近后备跳闸序列向量T可以表示为:  $T = [A^T_i D]$  (8)

其中,当 $T_i=1$ 时,断路器 $QF_i$ 为需要断开的关联断路器;当 $T_i=0$ 时,断路器 $QF_i$ 为不需要断开的关联断路器。

近后备保护动作条件:近后备保护范围内故障, 同时检测到本站对应故障元件的主保护或断路器未 动作,且超过主保护出口动作时间后就地故障电气 量依然存在。动作延时设定为主保护出口动作时 间。近后备保护跳闸策略流程图如图2所示。



图 2 线路近后备保护跳闸策略流程图 Fig.2 Flowchart of tripping strategy for local backup protection of line

1.2.2 断路器失灵跳闸策略算法

在保护算法检测出广域保护区内故障后,区域 主机根据 1.2.1 节的算法搜索近后备保护关联的断 路器;然后,通过站域主机向需要断开的关联断路器 发出跳闸命令,同时对流经它的电流相量进行监视, 在断路器熄弧后,若某一需要断开的关联断路器的 电流相量模值 | *α<sub>i</sub>* | 仍恒大于门槛值 δ,即判定该断 路器失灵。

为反映断路器的失灵信息,此时由区域主机构 造断路器失灵列向量 *S*,*S* 中元素的数目代表断路器 的数目,其排列顺序与节点-支路关联矩阵中各断路 器相同,元素 *S*<sub>i</sub> 可表示为:

$$S_{i} = \begin{cases} 1 & \text{MBBR } i \notin \mathbb{R} \\ 0 & \text{MBRR } i \notin \mathbb{R} \end{cases}$$
(9)

$$\boldsymbol{M}_{c} = \boldsymbol{A}_{t}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{A} \boldsymbol{S} \tag{10}$$

其中,AS的非零元素表示失灵断路器两端连接的元件。在向量 $M_{e}$ 中,0元素所在的位置表示对应断路器与失灵断路器之间无直接联系;非0元素所在的位置表示对应断路器与失灵断路器之间有直接联系。断路器 $QF_{21}$ 失灵元件-断路器关联度向量 $M_{e}$ = $(0, -\alpha_{12}, 0, 0, 0, -\alpha_{16}, 0, -\alpha_{18}, 0, 0, 0, -\alpha_{22}, -\alpha_{23}, 0, -\alpha_{25}, 0, 0, 0, 0, 0)^{T}$ 。

参照 1.2.1 节的分析,通过比较电流相量模值与 门槛值 δ 大小关系即可判断需断开的关联断路器。

根据前面定义的运算 *X*=[*Y*],断路器失灵跳闸向量 *M* 可表示为:

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{\perp}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{A} \boldsymbol{S} \end{bmatrix}$$
(11)

其中,当*M<sub>i</sub>*=1时,判定断路器QF<sub>i</sub>是需要断开的关 联断路器;当*M<sub>i</sub>*=0时,判定断路器QF<sub>i</sub>是不需要断 开的关联断路器。

断路器失灵保护动作条件:近后备保护范围内 故障,近后备保护已发出跳闸命令且等待时间超过 近后备加断路器失灵保护动作的最大延时后就地故 障电气量依然存在。动作延时设定为主保护动作时 间加上断路器跳闸熄弧时间。断路器失灵跳闸策略 流程图如图3所示。



图 3 断路器失灵时跳闸策略流程图 Fig.3 Flowchart of tripping strategy for breaker failure

1.2.3 变电站及出线远后备跳闸策略算法

当某一变电站直流电源消失时,断路器无法动 作跳闸。若出线或变电站内部发生故障时,则需要 执行变电站及其出线的远后备跳闸策略。

以变电站 B<sub>2</sub> 为主站的保护区域中,若变电站 B<sub>1</sub> 内部或出线故障时,区域主机形成的故障向量 D =(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)<sup>T</sup>,但由于变电站 B<sub>1</sub> 直流电源消失,自身无法切除故障,且无法向区域主 站上传断路器 QF<sub>14</sub>、QF<sub>15</sub>、QF<sub>17</sub> 和 QF<sub>19</sub> 的电流相量信 息,将正序电流列向量对应位置置 0,表示为  $I = (\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, 0, 0, \alpha_{16}, 0, \alpha_{18}, 0, \alpha_{20}, \alpha_{21}, \alpha_{22}, \alpha_{23}, \alpha_{24}, \alpha_{25}, \alpha_{26}, \alpha_{27}, \alpha_{28}, \alpha_{29}, \alpha_{30})^{T}$ 。此时需要实现的跳闸策略为变电 站所有出线的断路器失灵保护的跳闸策略<sup>118]</sup>,首先 搜寻到变电站关联断路器向量 G.

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D} \tag{12}$$

其中,当*G<sub>i</sub>*=1时,断路器QF<sub>i</sub>为变电站出线处的断路器;当*G<sub>i</sub>*=0时,断路器QF<sub>i</sub>不是变电站出线处的断路器。变电站关联断路器向量G可看作是失灵断路器向量,需要跳开所有和失灵断路器相连的其他断路器。定义远后备元件-断路器关联度向量*N<sub>e</sub>*为:

$$\mathbf{N}_{c} = \mathbf{A}_{t}^{\mathrm{T}} \mathbf{A} \mathbf{G} \tag{13}$$

其中,0元素所在的位置代表对应断路器与故障元

Ð

(15)

件之间无直接联系;非0元素所在的位置代表对应 断路器与故障元件之间有直接联系:当该断路器闭 合时,该断路器为需要断开的关联断路器;当该断路 器断开时,该断路器为不需要断开的关联断路器。对 于图 1,远后备跳闸初始向量  $I=(0,0,\alpha_{13},0,0,\alpha_{16},$  $0,\alpha_{18},0,\alpha_{20},0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^{T}$ 。若满足  $|\alpha_i|$  $(i=13,16,18,20)大于 \delta,则断路器 QF<sub>i</sub> 为需要断开$ 的关联断路器。

根据定义的运算 *X* = [*Y*],则断路器失灵跳闸向 量 *N* 可以表示为:

$$N = [A_{t}^{\mathrm{T}} A A^{\mathrm{T}} D]$$
(14)

其中,当 $N_i=1$ 时,可判定断路器 $QF_i$ 是此时需要断 开的关联断路器;当 $N_i=0$ 时,即可认为断路器 $QF_i$ 不是此时需要断开的关联断路器。

远后备保护动作条件:远后备保护范围内故障, 且等待时间超过近后备加断路器失灵保护动作的最 大延时后就地故障电气量依然存在。动作延时设定 为主保护动作时间加2个断路器跳闸熄弧时间。远 后备跳闸策略流程图如图4所示。

# 2 仿真验证

以新英格兰 10 机 39 节点系统为例,虚线围成 部分为以变电站  $B_2$  为主站的广域保护区域,如图 5 所示。在仿真系统中,额定功率  $S_N = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,额 定电压  $U_N = 100 \text{ kV}$ ,额定电流  $I_N = 0.5774 \text{ kA}$ ,门槛

	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0
$A_{\rm f}=$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0

#### 2.1 线路故障的近后备跳闸策略

以线路 L<sub>2-3</sub> 故障为例,形成的故障列向量为 **D**= (0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0)<sup>T</sup>,各断路器故障前 后的正序电流相量及线路近后备元件–断路器关联 度向量 **T**。如表 1 所示。

利用带方向的节点-支路关联矩阵 A<sub>f</sub>,并考虑到 故障后形成的修正电流列向量 I',形成正序电流对角



图 4 变电站及出线远后备跳闸策略流程图 Fig.4 Flowchart of tripping strategy for remote backup protection of substation and line

值  $\delta$ =0.0462 kA,故障发生在 0.3 s,并在 0.4 s 时切除。在该保护区域中,保护元件为变电站 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、 B<sub>4</sub>、B<sub>25</sub>、B<sub>30</sub>、B<sub>37</sub> 以及线路 L<sub>1-2</sub>、L<sub>2-3</sub>、L<sub>2-25</sub>、L<sub>2-30</sub>、L<sub>3-4</sub>、L<sub>25-37</sub>; 断路器为 QF<sub>1-2</sub>、QF<sub>1-39</sub>、QF<sub>2-1</sub>、QF<sub>2-3</sub>、QF<sub>2-25</sub>、QF<sub>2-30</sub>、QF<sub>3-2</sub>、 QF<sub>3-4</sub>、QF<sub>3-18</sub>、QF<sub>4-3</sub>、QF<sub>4-5</sub>、QF<sub>4-14</sub>、QF<sub>25-2</sub>、QF<sub>25-26</sub>、QF<sub>25-37</sub>、 QF<sub>30-2</sub>、QF<sub>306</sub>、QF<sub>37-25</sub>、QF<sub>376</sub>。

按照上述的保护元件和断路器的排列顺序,形成的带方向的节点-支路关联矩阵 *A*<sub>f</sub> 为:

# 2.2 断路器失灵的跳闸策略

以 L<sub>3-4</sub> 故障为例,根据 1.2.1 节,当线路 L<sub>3-4</sub> 内 部发生故障时,关联断路器序列为 **T**=(0,0,0,0,0,0,



#### 图 5 仿真模型图

Fig.5 Diagram of simulation model

#### 表1 各断路器故障前后的正序电流相量和 T<sub>a</sub>

Table 1	Pre-	and	post-	fault posi	itive-seq	uence	current
pha	asors	and	$T_{ci}$ of	different	circuit	break	ers

断败界	正序电流	ī相量/kA		
म्वतः विद्यारिय	0.29 s 时	0.39 s 时	$I_{ci}$ / KA	
$QF_{1-2}$	-0.3144-j0.3070	-4.9490+j0.0047	0	
$\mathrm{QF}_{1-39}$	0.3144+j0.3070	4.9490-j0.0047	0	
$QF_{2-1}$	0.7188+j0.2726	5.2062-j0.0190	0	
$QF_{2-3}$	-3.0184 - j2.7102	-34.5723-j1.9616	-34.5723-j1.9616	
QF <sub>2-25</sub>	0.3223+j0.2345	10.5394+j1.8436	0	
$QF_{2-30}$	1.9773+j2.2031	18.8267+j0.1371	0	
$QF_{3-2}$	3.1582+j2.6912	-17.3950+j2.7135	- 17.397 1+ j2.713 8	
$QF_{3-4}$	-0.9178 - j0.4723	8.9445-j1.0482	0	
$\mathrm{QF}_{3-18}$	-0.0420 - j0.5554	9.2349-j1.1767	0	
QF <sub>4-3</sub>	1.0299+j0.4512	-8.8947+j1.0366	0	
QF <sub>4-5</sub>	1.0676+j1.1921	6.7374+j0.5450	0	
QF <sub>4-14</sub>	1.0728+j1.0236	4.7021+j0.4748	0	
QF <sub>25-2</sub>	-0.2391-j0.2425	$-10.4935{-}j1.8493$	0	
$\mathrm{QF}_{25-26}$	-0.1861-j1.0234	1.3507-j0.3845	0	
$QF_{25-37}$	0.8207+j2.5348	9.6517+j3.4661	0	
QF <sub>30-2</sub>	- 1.9773 - j2.2031	-18.8267-j0.1371	0	
$QF_{30G}$	1.9773+j2.2031	18.8267+j0.1371	0	
QF <sub>37-25</sub>	-0.8207-j2.5348	-9.6517-j3.4661	0	
QF <sub>37G</sub>	0.8207+j2.5348	9.6517 +j3.4661	0	

表 2 各断路器跳闸前后的正序电流相量和 M<sub>ai</sub>

Table 2 Pre- and post-trip positive-sequence current phasors and  $M_{ci}$  of different circuit breakers

断敗哭	正序电流	$M/l_{c}$		
四月 印日 泊다	0.29 s 时	0.45 s 时	$M_{ci}/KA$	
$QF_{1-2}$	-2.1494-j0.1328	-0.4003-j0.3012	0	
$QF_{1-39}$	2.1494+j0.1328	0.4003+j0.3012	0	
$QF_{2-1}$	2.4958+j0.1078	0.8022+j0.267 0	0	
$QF_{2-3}$	-14.9485-j1.7377	-3.4236-j2.5697	0	
$\mathrm{QF}_{2-25}$	3.8051+j0.4427	0.2991+j0.1454	0	
$QF_{2-30}$	8.6475+j1.1872	2.3223+j2.1573	0	
$QF_{3-2}$	15.0343+j1.7281	3.5613+j2.5514	0	
$\mathrm{QF}_{3-4}$	-20.5615+j0.3881	-j0.0001	-j0.000 1	
$\mathrm{QF}_{318}$	6.7529-j1.2046	-1.1377-j0.7180	0	
$QF_{4-3}$	-18.5541+j1.7673	-19.2523 + j2.0694	0	
QF <sub>4-5</sub>	11.2159-j0.1198	11.1376-j0.1887	-11.1376+j0.1887	
$QF_{4-14}$	信息缺失	信息缺失	-9.6697+j0.5085	
$\mathrm{QF}_{252}$	-3.7372-j0.4493	-0.2168-j0.1533	0	
$\mathrm{QF}_{25-26}$	-0.4090-j0.8365	-0.4877-j1.0717	0	
$\mathrm{QF}_{25-37}$	4.6428+j2.7667	1.1119+j2.5291	0	
$QF_{30-2}$	-8.6475-j1.1872	-2.3223-j2.1573	0	
$\mathrm{QF}_{\mathrm{30G}}$	8.6475+j1.1872	2.3223+j2.1573	0	
QF <sub>37-25</sub>	-4.6428-j2.7667	-1.1119-j 2.5291	0	
$\mathrm{QF}_{\mathrm{37G}}$	4.6428+j2.7667	1.1119+j2.5291	0	

0,0,0,0,0,0)<sup>T</sup>,区域主机向断路器 QF<sub>4-5</sub> 和 QF<sub>4-14</sub> 发 出跳闸命令。

#### 2.3 变电站及出线的远后备跳闸策略

以变电站  $B_2$ 内部发生故障时,由于直流电源消 失而不能切除故障为例,满足广域保护附加判据,形 成故障列向量  $D = (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^{T}$ , 故障前后各断路器的正序电流相量及区域远后备元 件-断路器关联度向量  $N_c$ 如表 3 所示。

表 3 各断路器跳闸前后的正序电流相量和 N<sub>a</sub>

Table 3 Pre- and post-trip positive-sequence current phasors and  $N_{ci}$  of different circuit breakers

	1		
新敗界	正序电流	【相量/kA	N /l. A
叫时前	0.29 s 时	0.39 s 时	$N_{ci}/KA$
$QF_{1-2}$	-0.3625-j0.3422	-8.9121-j0.1609	-8.9121-j0.1609
QF <sub>1-39</sub>	0.3625+j0.3422	8.9121+j0.1609	0
$\mathrm{QF}_{2-1}$	0	0	0
$\mathrm{QF}_{2-3}$	0	0	0
QF <sub>2-25</sub>	0	0	0
$\mathrm{QF}_{2-30}$	0	0	0
$\mathrm{QF}_{3-2}$	3.0635+j2.6106	-13.6544+j2.3286	-13.6557+j2.3288
$\mathrm{QF}_{3-4}$	-0.2060-j1.6388	-0.9465-j1.7161	0
$\mathrm{QF}_{3-18}$	0.0198-j0.5063	7.9410-j0.8248	0
$\mathrm{QF}_{4-3}$	0.9880+j0.4212	-6.8927+j0.7291	0
$\mathrm{QF}_{4-5}$	1.0938+j1.2079	5.6305+j0.8213	0
$QF_{4-14}$	1.0945+j1.0367	4.1001+j0.6779	0
QF <sub>25-2</sub>	0	0	0
QF <sub>25-26</sub>	-0.2606-j1.1019	-1.4604-j1.1437	0
QF <sub>25-37</sub>	0.6453+j2.3677	1.8722+j2.4672	0
QF <sub>30-2</sub>	-2.1590 - j2.3231	-33.3448+j0.1517	-33.3448+j0.1517
QF <sub>30G</sub>	2.1590+j2.3231	33.3448-j0.1517	0
QF <sub>37-25</sub>	-0.6453-j2.3677	-1.8722-j2.4672	0
QF <sub>37G</sub>	0.6453+j2.3677	1.8722+j2.4672	0

Ð

B

由表 3 可以看出,断路器 QF<sub>25-2</sub> 在故障前后正序 电流相量均为 0,可知断路器 QF<sub>25-2</sub> 为断开状态。 将表 3 中正序电流列向量的数据代入 *G*=*A*<sup>T</sup>*D*、*N*= [*A*<sup>T</sup><sub>1</sub>*A*<sup>T</sup>*D*],以及由 δ=0.046 2 kA,可得 *N*=(1,0,0,0, 0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0)<sup>T</sup>,则区域主机向断 路器 QF<sub>1-2</sub>,QF<sub>3-2</sub> 和 QF<sub>30-2</sub> 发出跳闸命令。

# 3 结论

本文提出了一种基于方向权重的跳闸策略,该 方法具有如下特点:

a. 采用正序电流相量的模值, 而非该时刻的瞬时值, 因此无需各区域子站上传的信息完全同步;

**b.** 跳闸算法能够准确识别出各种情况下本区 域需要跳开的断路器,并在最小范围内切除故障;

**c.** 当区域内断路器处的电气量信息缺失时,该 方法仍能正确识别需要跳开的关联断路器,具有较 好的容错性。

# 参考文献:

[1] 王艳,金晶,焦彦军. 广域后备保护故障识别方案[J]. 电力自动化 设备,2014,34(12):70-75,99.

WANG Yan, JIN Jing, JIAO Yanjun. Fault identification scheme for wide-area backup protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12):70-75, 99.

- [2] 何志勤,张哲,尹项根,等. 电力系统广域继电保护研究综述[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):125-130.
  HE Zhiqin,ZHANG Zhe,YIN Xianggen, et al. Overview of power systems wide area protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):125-130.
- [3] MA Jing, LI Jinlong, THORP J S, et al. A fault steady state component-based wide area backup protection algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 468-475.
- [4] 姜宪国,王增平,李琛. 基于稀疏 PMU 布点的广域保护全网时间 同步方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):122-127.
  JIANG Xianguo,WANG Zengping,LI Chen. Whole-network time synchronization of wide-area protection based on sparse PMU placement[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9): 122-127.
- [5] 李振兴,尹项根,张哲,等. 有限广域继电保护系统的分区原则与 实现方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(19):48-52.
  LI Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Zone division and implementation on limited wide area protection systems[J].
  Automation of Electric Power Systems,2010,34(19):48-52.
- [6]马静,王希,王增平.圆网格式保护区域交叠全覆盖分区新方法[J].电力自动化设备,2012,32(9):50-54.

MA Jing, WANG Xi, WANG Zengping. Partition of protection zone with circular overlapping coverage for wide-area protection system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 50-54.

[7] 马静,李金龙,王增平,等. 基于故障关联因子的新型广域后备保护[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):100-107.

MA Jing, LI Jinlong, WANG Zengping, et al. Wide-area back-up

protection based on fault correlation factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31):100-107.

- [8] HE Zhiqi,ZHANG Zhe,CHEN Wei,et al. Wide-area backup protection algorithm based on fault component voltage distribution [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26 (4):2752-2760.
- [9] 童晓阳,王睿,孙明蔚. 基于保护元件与 PMU 数据多源的广域后 备保护算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):11-16,35. TONG Xiaoyang,WANG Rui,SUN Mingwei. Wide-area backup protection algorithm based on multi-source data of protection elements and phasor measurement units[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(14):11-16,35.
- [10] LI Zhengxin, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Wide-area protection fault identification algorithm based on multiinformation fusion [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1348-1345.
- [11] 李振兴,尹项根,张哲,等. 分区域广域继电保护的系统结构与故障识别[J]. 中国电机工程学报,2011,31(28):95-103.
  LI Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Study on system architecture and fault identification of zone-division wide area protection [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31 (28):95-103.
- [12] 尹项根,汪旸,张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与 跳闸策略[J]. 中国电机工程学报,2010,30(7):1-7.
  YIN Xianggen,WANG Yang,ZHANG Zhe. Zone-division and tripping strategy for limited wide area protection adapting to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(7):1-7.
- [13] 丛伟,潘贞存,赵建国,等. 基于电流差动原理的广域继电保护系统[J]. 电网技术,2006,30(5):91-95,110.
  CONG Wei,PAN Zhencun,ZHAO Jianguo, et al. A wide area protective relaying system based on current differential protection principle[J]. Power System Technology,2006,30(5): 91-95,110.
- [14] 李丰,王来军,文明浩,等. 广域后备保护智能跳闸策略研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):84-87,92.
  LI Feng,WANG Laijun,WEN Minghao, et al. Intelligent trip strategy for wide-area backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):84-87,92.
- [15] 周良才,张保会,薄志谦. 广域后备保护系统的自适应跳闸策略
  [J]. 电力系统自动化,2011,35(1):55-60,65.
  ZHOU Liangcai,ZHANG Baohui,BO Zhiqian. Self-adaptive tripping strategy of wide area backup protection system[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(1):55-60,65.
- [16] 李振兴,尹项根,张哲,等. 基于多信息融合的广域继电保护新 算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):14-18.
  LI Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Wide area protection algorithm based on multi-information fusion[J].
  Automation of Electric Power Systems,2011,35(9):14-18.
- [17] 张俣好,马静,王增平.利用拓扑基与半径搜索法识别厂站内拓 扑[J]. 电网技术,2013,37(9):2664-2668.
  ZHANG Yuyu,MA Jing,WANG Zengping. Identification of topology inside substation by basis and radius search method [J]. Power System Technology,2013,37(9):2664-2668.
- [18] 姜宪国,王增平,李琛,等. 区域自治式后备保护分区方案[J]. 电工技术学报,2013,28(1):234-241.

第35卷

JIANG Xianguo, WANG Zengping, LI Chen, et al. Zoning scheme of regional autonomy backup protection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1);234-241.

 [19] 钱诚,王增平,张晋芳. 基于同步相量测量的厂站内网络拓扑新 方方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(17):80-86.
 QIAN Cheng,WANG Zengping,ZHANG Jinfang. A novel substation topology analysis algorithm based on synchronized

substation topology analysis algorithm based on synchronized phasor measurement[J]. Power System Protection and Control, 2011,39(17):80-86.

[20] 王增平,张晋芳,钱诚. 基于同步测量信息的电网拓扑错误辨识 方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):1-6.

WANG Zengping,ZHANG Jinfang,QIAN Cheng. Topology error identification based on synchronized measurements for power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1): 1-6. 作者简介:



马 静(1981—),男,山西阳泉人,副教 授,博士后,研究方向为电力系统保护与控 制(**E-mail**;hdmajing@aliyun.com);

裴 迅(1989—),男,河北保定人,硕士,
 从事电力系统继电保护方面的研究(E-mail:
 ncepupx@163.com);

马 伟(1989—),男,甘肃平凉人,硕士 研究生,主要从事电力系统继电保护、供电恢

#### 复等方面的研究(E-mail:jnyz-mawei@163.com);

王增平(1964—),男,河北辛集人,教授,博士研究生导师, 博士,研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动 化(**E-mail**:wangzp1103@aliyun.com)。

# Tripping strategy based on directional weight for wide-area backup protection

MA Jing<sup>1</sup>, PEI Xun<sup>2</sup>, MA Wei<sup>1</sup>, WANG Zengping<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. Fangshan Power Supply Bureau, State Grid Beijing Electric Power Grid, Beijing 102401, China)

Abstract: With the prerequisite that the faulty element has been identified by the limited wide-area centralized backup protection, a tripping strategy based on directional weight is proposed for the wide-area backup protection. A node-branch correlation matrix is formed based on the directional weight according to the network topology and the positive-sequence current phasor information within the area. A component-breaker relevance vector is constructed according to the results of fault identification and circuit breaker failure detection, based on which, the relevant circuit breaker is recognized and tripped. The simulative results demonstrate that, the proposed method simplifies the cooperation relationship of backup protection; the fault is cut off with the minimum blackout zone; the requirement for information synchronization is not strict; and it has better reliability and applicability even when partial circuit breaker information is lost.

Key words: relay protection; wide-area protection; tripping strategy; electric circuit breakers; directional weight; component-breaker relevance vector

(上接第106页 continued from page 106)

# Back-flashover resistance level of ±800 kV/500 kV AC-DC hybrid transmission lines

LI Ruifang<sup>1</sup>, CAO Xiaobin<sup>1</sup>, ZHANG Xianyi<sup>2</sup>, CHEN Kui<sup>1</sup>, SHEN Jiajie<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610000, China;

3. Texas Instruments Semiconductor Technology Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: A simulation model of back-flashover resistance level is built based on PSCAD/EMTDC for  $\pm 800 \text{ kV}/500 \text{ kV}$  AC-DC hybrid transmission lines and the effect of tower grounding resistance, insulator piece quantity, lightning waveform, tower height and lightning arrester on the back-flashover resistance level is discussed. The effect of grounding resistance on the level is emphatically analyzed from the aspect of shunt coefficient. The back-flashover resistance level of  $\pm 800 \text{ kV}/500 \text{ kV}$  AC-DC hybrid transmission lines is compared with that of 500 kV dual-loop lines on same tower and that of  $\pm 800 \text{ kV}$  DC line respectively. The theoretical analysis shows that: as the  $\pm 800 \text{ kV}/500 \text{ kV}$  AC-DC hybrid transmission lines, the back-flashover resistance level of its  $\pm 800 \text{ kV}/500 \text{ kV}$  AC-DC hybrid transmission lines, the back-flashover resistance level of its  $\pm 800 \text{ kV}/500 \text{ kV}$  AC-DC hybrid transmission lines, the back-flashover resistance level of its  $\pm 800 \text{ kV}/500 \text{ kV}$  AC-DC hybrid transmission lines, the back-flashover resistance level of its  $\pm 800 \text{ kV}$  line is above two times higher than that of stand-alone  $\pm 800 \text{ kV}$  DC line and 500 kV dual-loop lines respectively; the back-flashover resistance level drops abruptly when the grounding resistance reaches a certain value.

Key words: AC-DC hybrid; back flashover; lightning resistance level; shunt coefficient; PSCAD/EMTDC; AC power transmission; DC power transmission

Ð