广域继电保护故障区域的自适应识别方法

李振兴^{1,2},尹项根^{1,2},张 哲^{1,2},王育学¹,唐金锐² (1.强电磁工程与新技术国家重点实验室,华中科技大学,湖北省武汉市 430074; 2.电力安全与高效湖北省重点实验室,华中科技大学,湖北省武汉市 430074)

摘要:以降低广域保护范围的系统通信量为目的,提出了广域继电保护的故障区域自适应识别原则及实现方法。结合电力系统故障时序电压的分布特点,讨论了序电压分布受短线路、复故障和高 阻接地等因素的影响。同时,实时监视电网广域范围内各母线的序电压,并进行排序计算,由专家 系统根据排序结果进行疑似故障区域的分析,实现自适应识别故障区域。故障元件识别算法仅与 故障区域内的智能电子设备通信,大幅降低了网络通信量。区别于以往广域继电保护的固定分区 方法,系统通过监视故障启动母线的序电压识别故障区域,不受电网结构变化的影响,更易获得电 网灵敏度较高的故障信息。仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词:广域继电保护;故障区域;自适应;序电压;图论

0 引言

广域继电保护系统集中式结构因具有网络信息 通信量小、易于与稳定控制系统结合、冗余信息多等 优点而被广泛关注^[1-3]。对于复杂的大电网系统,基 于集中式结构的广域继电保护通过获取区域内所有 智能电子设备(IED)的信息进行故障识别,系统决 策中心站通信量必然较大,在可靠识别故障的前提 下如何降低保护系统的通信量是亟待研究的重点问 题之一^[4-6]。

将复杂的大电网系统进行区域划分,然后分别 实现分区域的后备保护是降低广域保护系统通信 量,易于工程实现的方法之一^[7-9]。文献[7]通过代 理(agent)实时跟踪系统中一次、二次设备状态信息 及电网拓扑结构变化,并在线确定各一次设备的主、 后备保护区域。文献[8]通过广域保护范围内 IED 之间关联系数值的大小,提出了基于 Petri 网络的 专家分区系统。文献[9]通过电网拓扑结构的关联 矩阵,提出了基于图论技术的有限广域保护分区。 上述研究基本上都是基于电网拓扑结构的关系,利 用专家系统的运算进行保护区域划分,但不能反映 系统故障点与保护区域的关系。在系统故障时,只 能通过各故障区域的保护运算确定故障位置;在区 域边界故障时,分区域决策单元仅接收到边界节点 的故障信息,不能体现广域保护的优越性。

如何在有限的区域内实现可靠地故障元件识别 又能降低通信量的研究甚少^[10]。文献[10]通过实 时监视保护区域内各母线正序电压,通过计算电网 系统故障时各母线正序电压排序结果,将排序最小 的母线认为是距离故障点最近的母线,决策中心仅 需获取该母线及相连线路的测量信息进行故障元件 识别,大幅降低了保护系统的通信量。但在系统发 生故障时,强电源侧母线正序电压变化较小,排序判 据存在灵敏度不足。同时,在系统发生故障时,短线 路两端母线序电压相差较小,受测量误差和计算误 差影响,可能导致正序电压排序判据判断错误。

本文从降低系统通信量的角度出发,通过分析 电网系统故障时序电压的分布特点,提出了基于序 电压分布的广域继电保护自适应构建故障区域的方 法。该方法不受电网结构变化的影响,通过实时电 压监测即可自适应形成以一次故障点为中心的保护 区域。

1 电力系统故障时序电压分布特点

图1为1个简单广域输电系统。



在系统发生简单故障时,序电压分布特点较为 明显:近故障点母线正序电压低于远故障点的母线 正序电压,其负(零)序电压高于远故障点母线的负 (零)序电压。但对于特殊的系统结构(如短线路、中

性点接地的变压器)或发生高阻接地故障、复故障

收稿日期: 2011-03-05; 修回日期: 2011-04-17。

国家自然科学基金资助项目(50877031,50837002)。

时,序电压分布特点变得较为复杂,与序电压分布特 点不符,详细分析参见附录 A。

2 基于序电压分布自适应识别故障区域

2.1 序电压排序

根据电力系统故障时序电压分布特点,在系统 发生简单故障时,通过对电网母线的序电压幅值大 小排序,将正序电压最小或负(零)序电压最大的母 线确定为距离故障点最近的母线,定义为疑似故障 母线,该母线及相连线路定义为疑似故障区域。

为降低保护系统的通信量,在各变电站 IED 设 置启动判据,集中式决策中心只需获取 IED 启动判 据动作的母线序电压进行排序分析。为进一步降低 保护系统的通信量,各 IED 的启动判据设置高、低 定值启动门槛值。在系统发生非高阻接地性故障 时,因为低定值启动判据灵敏度较高,保护区域内较 多母线的低定值启动判据灵敏度较高,保护区域内较 象母线的低定值启动判据会动作,如果决策中心获 取所有启动母线的序电压,则明显不能达到降低系 统通信量的效果。鉴于高定值启动判据灵敏度较 低,此时决策中心仅获取高定值启动判据动作母线 的序电压,保护系统的通信量可明显大幅度降低。 在系统发生高阻接地故障时,高定值启动判据灵敏 度不足,此时仅较少母线的低定值启动判据动作,决 策中心仅获取低定值启动判据动作母线的序电压,保护系统的通信量亦可大幅度降低。

启动判据如下:

$$\begin{cases} K_{i(1)} = \frac{U_{i(1)}}{U_{\rm N}} < K_{\rm Hset(1)} \\ K_{i(2)} = \frac{U_{i(2)}}{U_{\rm N}} > K_{\rm Hset(2)} \end{cases}$$
(1)

$$\begin{bmatrix}
K_{i(0)} = \frac{U_{i(0)}}{U_{N}} > K_{\text{Hset}(0)} \\
K_{i(1)} = \frac{U_{i(1)}}{U_{N}} < K_{\text{Lset}(1)} \\
K_{i(2)} = \frac{U_{i(2)}}{U_{N}} > K_{\text{Lset}(2)} \\
U_{i(0)} > K
\end{bmatrix}$$
(2)

$$K_{i(0)} = \frac{U_{i(0)}}{U_{\rm N}} > K_{\rm Lset(0)}$$

式中: $U_{i(1)}$, $U_{i(2)}$, $U_{i(0)}$ 分别为母线 *i* 的正序、负序和 零序电压的幅值(*i*=1,2,...,*n*); U_N 为母线的额定 相电压; $K_{i(1)}$, $K_{i(2)}$, $K_{i(0)}$ 分别为母线 *i* 的正序、负序 和零序电压的比例系数; $K_{Lset(1)}$, $K_{Lset(2)}$, $K_{Lset(0)}$ 分别 为正序、负序和零序电压低定值启动判据门槛值; $K_{Hset(1)}$, $K_{Hset(2)}$, $K_{Hset(0)}$ 分别为正序、负序和零序电 压高定值启动判据门槛值; $K_{Lset(1)}$ 取为 90%, $K_{Lset(2)}$ 和 $K_{Lset(0)}$ 取为 2%~5%, $K_{Hset(1)}$ 取为 50%, $K_{Hset(2)}$ 和 $K_{Hset(0)}$ 取为 10%。

本文研究的广域继电保护系统是基于集中式结

构的保护系统。正常情况下,各变电站 IED 实时监测和计算母线序电压,并进行保护启动判据的判断; 决策中心实时发送召唤系统有无启动判据动作的命令。在系统发生非高阻接地故障时,如果 IED 检测 到母线序电压高定值启动判据动作标志上送至决策中 心,决策中心收到高定值启动判据动作标志上送至决策中 心,决策中心收到高定值启动判据动作标志后,停止 发送召唤启动判据动作信息的命令。在系统发生高 阻接地故障时,如果母线序电压高定值启动判据未 动作,IED 在收到决策中心召唤命令后,将低定值启 动判据动作的母线序电压上送至决策中心。决策中 心检测到母线序电压保护判据启动后,将汇聚的母 线序电压值进行排序。设由式(1)和式(2)得到的母 线进行排序:

$$\min\{ \mid K_{1(1)} \mid , \mid K_{2(1)} \mid , \dots , \mid K_{p(1)} \mid \}$$
(3)

$$\max\{ \mid K_{1(2)} \mid , \mid K_{2(2)} \mid , \cdots , \mid K_{n(2)} \mid \}$$
(4)

$$\max\{ \mid K_{1(0)} \mid , \mid K_{2(0)} \mid , \dots , \mid K_{z(0)} \mid \}$$
(5)

2.2 疑似故障区域分析

在系统发生不同类型的故障时,序电压反映出 不同的特点。根据启动判据得到的序电压排序结 果,对不同故障类型进行疑似故障区域分析,初步形 成疑似故障区域和疑似故障母线,具体分为以下几 种情况:

1)当线路发生对称故障时,系统中零序电压几 乎为0;由于故障后线路不再是完全换位,系统会出 现较小的负序电压,但基本上小于 K_{Hset(2)}U_N。所 以,在各母线的负序电压和零序电压判据没有启动 时,仅需将正序电压判据启动的母线根据式(3)进行 排序,正序电压幅值最小的母线视为疑似故障母线, 该母线及相连线路构成疑似故障区域。

2)当线路发生不对称故障时:①如果零序电压 启动,则说明系统发生接地故障,负序电压和零序电 压启动判据均有较高的灵敏度,受系统结构及变压 器接地的影响可能两者排序最大的母线不一致,但 也应该是两相邻母线或次相邻母线,取式(5)中零序 电压排序最大的母线作为疑似故障母线,该母线及 相连线路构成疑似故障区域;②如果零序电压没有 启动而负序电压启动,则说明系统发生相间短路故 障,取式(4)中负序电压排序最大的母线作为疑似故 障母线,该母线及相连线路构成疑似故障区域。

3)当电网发生复杂故障时,各母线序电压排序 结果可能不一致,考虑母线序电压受多点故障电压 分量的影响,将3个序电压排序结果中,正序电压最 小、负(零)序电压最大的母线均视为疑似故障母线, 该母线与相连线路构成疑似故障区域。

2.3 故障区域构建原则

电网中发生故障时,仅故障线路相邻小范围内 的短路电流水平会发生显著变化,继电保护具有较 高的动作灵敏性和选择性;而远离故障线路区域的 短路电流水平变化较小,继电保护的动作灵敏性明 显降低,计及广域保护实现继电保护后备保护的功 能,远离故障区域的线路或其他设备不在广域继电 保护系统的保护范围内。

在电网发生简单故障时,根据疑似故障区域分 析,可以将疑似故障母线与相连线路构成故障区域。 但受电网系统结构和复杂故障的影响,简单故障时 疑似故障区域分析明显还不能把故障点包含在故障 区域内,如图 2 所示。



Fig. 2 Characteristics of suspected fault zones

为消除短线路、高阻接地、复故障等对母线序电 压排序结果的影响,故障区域应尽可能包含序电压 排序结果的多个启动母线。原则如下:

1)初始故障区域:由图 2(a)可以看出,点 F_1 发 生三相短路故障时,受短线路 L_3 的影响,系统测量 母线 U_4 的正序电压低于母线 U_3 的正序电压,根据 疑似故障分析确立疑似故障区域为(U_4 , L_3 , L_4),并 不包含故障线路 L_2 。所以在故障区域识别时,考虑 短线路的影响,系统将序电压排序结果前几个母线 及其相连线路共同构成初始故障区域。由图 2(b) 可以看出,故障区域包含短线路两端母线 U_3 , U_4 及 U_3 的对端母线 U_2 , U_4 的对端母线 U_5 。所以,本文 研究系统选定序电压排序结果的前 4 条(排序结果 大于4 条母线时,否则选择全部)母线作为疑似故障 母线。

2)辅助故障区域:由图 2(c)可以看出,点 F_1 发 生高阻接地故障时,如果系统测量启动判据动作的 母线仅为 U_3 ,则根据初始故障区域原则仅形成区域 $(U_3, L_2, L_3);$ 受短线路的影响,如果启动判据动作 的母线仅为 U_4 ,则根据初始故障区域原则仅形成区域(U_4 , L_3 , L_4)。第1种情况可以包含故障线路,但 保护所需的冗余信息较少;第2种情况不能包含故 障线路。所以,受高阻接地故障的影响,保护判据灵 敏度较低,启动的母线较少,为避免出现上述2种情 况,本文研究以疑似故障母线为中心点,保护范围能 够达到下一条线路的末端,由此构成的区域形成辅 助故障区域。

3)故障区域合并:由图 2(d)可以看出,在系统 检测到序电压排序结果小于 4 条母线时,为获取更 多的广域冗余信息,将初始故障区域与辅助故障区 域合并构成故障区域。

4)多区域形成:受系统结构和复杂故障等因素 影响,序电压排序可能结果不一致,分别根据序电压 排序结果按照原则1~原则3构建多故障区域。

5)多区域检验:由图 2(e)可以看出,对原则 4 构建的多区域进行检验,如果任意 2 个区域交互,则 直接合并这 2 个区域;由图 2(f)可以看出,如果区域 不交互,为降低系统通信量,不合并该区域,系统分 别对 2 个故障区域进行故障元件识别计算。

2.4 故障区域识别的实现方法

本文以图 1 所示系统为例,说明广域继电保护 系统故障区域识别的实现方法。在电网形成的网络 拓扑图中,定义母线、线路等被保护元件为图论节 点,如U₁,L₁,…,U_n。

根据文献[9]中邻接矩阵和次邻接矩阵的定义, 按照图 1 系统,可写出邻接矩阵 C 和次邻接矩阵 P:

	U_1	L_1	${U}_2$	L_2	$U_{\scriptscriptstyle 3}$	L_3	${U}_4$	L_4	${U}_{\scriptscriptstyle 5}$
	0	1	0	0	0	0	0	0	$_0$ U_1
	1	0	1	0	0	0	0	0	$0 L_1$
	0	1	0	1	0	0	0	0	$0 \mid U_2$
	0	0	1	0	1	0	0	0	$0 \mid L_2$
C =	0	0	0	1	0	1	0	0	$0 \mid U_3$
	0	0	0	0	1	0	1	0	$0 \mid L_3$
	0	0	0	0	0	1	0	1	$0 \mid U_4$
	0	0	0	0	0	0	1	0	$1 \mid L_4$
	0	0	0	0	0	0	0	1	$0 U_5$
	U_1	L_1	U_2	L_2	$U_{\scriptscriptstyle 3}$	L_3	U_4	L_4	U_{5}
	U_1 $\begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix}$	L_1 1	U_2 1	L_2 1	U_3 1	$L_{3} = 0$	$U_4 \ 0$	$L_4 \\ 0$	$\begin{bmatrix} U_5 \\ 0 \end{bmatrix} U_1$
	U_1 $\begin{bmatrix} 1\\ 1 \end{bmatrix}$	$L_1 \ 1 \ 1$	U_2 1 1	$egin{array}{c} L_2 \ 1 \ 1 \end{array}$	U_3 1 1	L3 0 1	$egin{array}{c} U_4 \ 0 \ 0 \end{array}$	$egin{array}{c} L_4 \ 0 \ 0 \end{array}$	$egin{array}{c} U_5 \\ 0 \\ 0 \\ L_1 \end{array}$
	U_1 $\begin{bmatrix} 1\\ 1\\ 1\\ 1 \end{bmatrix}$	$L_1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1$	$egin{array}{c} U_2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \end{array}$	L_{2} 1 1 1	U_{3} 1 1 1	$L_{3} \\ 0 \\ 1 \\ 1$	$egin{array}{c} U_4 \ 0 \ 0 \ 1 \end{array}$	$egin{array}{c} L_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}$	$egin{array}{c} U_5 \ 0 & U_1 \ 0 & L_1 \ 0 & U_2 \end{array}$
P	U_1 $\begin{bmatrix} 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1 \end{bmatrix}$	$L_1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1$	$U_2 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1$	$L_2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ $	U_{3} 1 1 1 1	$L_{3} \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1$	$egin{array}{c} U_4 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \end{array}$	$L_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1$	$U_5 \\ 0 \ U_1 \\ 0 \ L_1 \\ 0 \ U_2 \\ 0 \ L_2$
P =	U_1 $\begin{bmatrix} 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1 \end{bmatrix}$	L_1 1 1 1 1 1	U_2 1 1 1 1 1 1 1 1 1	L_2 1 1 1 1 1 1	$U_{3} \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1$	L_{3} 0 1 1 1 1 1	$U_4 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1$	L_4 0 0 0 1 1	$egin{array}{cccc} U_5 & & & \ 0 & U_1 & & \ 0 & L_1 & & \ 0 & U_2 & & \ 0 & L_2 & & \ 1 & U_3 & & \end{array}$
P =	U_1 $\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	L_1 1 1 1 1 1 1 1	$U_2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ $	L_2 1 1 1 1 1 1 1	U_{3} 1 1 1 1 1 1 1 1	$egin{array}{c} L_3 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1$	$U_4 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1$	L_4 0 0 1 1 1	$U_{5} \\ 0 \\ U_{1} \\ 0 \\ L_{1} \\ 0 \\ U_{2} \\ 0 \\ L_{2} \\ 1 \\ U_{3} \\ 1 \\ L_{3} \end{bmatrix}$
P =	$egin{array}{c} U_1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{array}$	$egin{array}{c} L_1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \$	U_2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	$egin{array}{c} L_2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ $	U_{3} 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	$egin{array}{c} L_3 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1$	$egin{array}{c} U_4 & \ 0 & \ 0 & \ 1 & $	$egin{array}{c} L_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array}$	$U_{5} \\ 0 \\ 0 \\ L_{1} \\ 0 \\ U_{2} \\ 0 \\ L_{2} \\ 1 \\ U_{3} \\ 1 \\ L_{3} \\ 1 \\ U_{4} \\ \end{bmatrix}$
P =	U_1 $\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$egin{array}{ccc} L_1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0$	U_2 1 1 1 1 1 1 1 1 0	$egin{array}{cccc} L_2 & 1 & & \ 1 & 1 & & \ 1 & 1 & & \ 1 & 1 &$	U_3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	$egin{array}{c} L_3 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1$	$egin{array}{c} U_4 & \ 0 & \ 0 & \ 1 & $	$egin{array}{c} L_4 & \ 0 & \ 0 & \ 0 & \ 1 & $	$\begin{array}{c} U_5 \\ 0 \\ 0 \\ L_1 \\ 0 \\ U_2 \\ 0 \\ L_2 \\ 1 \\ U_3 \\ 1 \\ L_3 \\ 1 \\ U_4 \\ 1 \\ L_4 \end{array}$

— 17 —

1)初始故障区域实现:根据疑似故障区域分析, 取排序前4的母线节点,在矩阵C中搜索各节点行 中非零元素对应的列节点,由母线节点和搜索节点 组成保护初始故障区域。

2)辅助故障区域实现:根据疑似故障区域分析, 取疑似故障母线节点,在矩阵 P 中搜索该节点行中 非零元素对应的列节点,由母线节点和搜索节点组 成保护辅助故障区域。

3)多区域检验实现:在矩阵 C 中分别搜索任意 2 个区域中母线节点行中非零元素对应的列。如果 这 2 个区域的搜索列有相同的线路节点,则合并这 2 个区域,否则不合并。

故障区域识别的流程如附录 B 图 B1 所示。

在故障区域形成后,下一步任务是如何利用故 障区域多信息可靠识别出故障元件,目前广域继电 保护算法研究已较多^[11-12],这里不再详述。

3 算例仿真

为验证本文故障区域自适应构建方法,利用电 磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建的 IEEE 10 机 39 节点电网系统模型进行仿真验证。仿真系 统的单线图及其支路编号如图 3 所示。

分别设置线路 L_7 距离母线 B_7 侧 10%处的点 F_1 发生 A 相接地故障,接地电阻为 0 Ω ,100 Ω , 300 Ω ;线路 L_3 距离母线 B_4 侧 10%处的点 F_2 发生 AB 相间、AB 两相接地和 ABC 相间短路故障;在点 F_1 发生 A 相接地故障,同时点 F_2 发生 BC 相间短路故障。故障发生时,统计启动各母线序电压的比例系数,如表 1~表 3 所示。因为点 F_1 接地故障时,负序与零序电压排序结果相同,表 1 仅给出了零序电压计算结果和正序电压计算结果。点 F_2 的 BC 相间短路故障时,负序电压与正序电压排序结果相同,表 2 仅给出负序电压计算结果;BC 两相接地故障时负序、正序与零序电压排序结果相同,表 2 仅给出零序电压计算结果。表 3 给出了点 F_1 , F_2 发生复故障时的序电压计算结果。



51.44										
丏线	$K_{(0)}(r=0 \ \Omega)$	$K_{(1)}(r=0 \ \Omega)$	$K_{(0)}(r=100 \ \Omega)$	$K_{(1)}(r=100 \ \Omega)$	$K_{(0)}(r=300 \ \Omega)$	$K_{(1)}(r=300 \ \Omega)$				
B_2	0.8	100.0	0.2	100.0	0	103.0				
B_3	3.7	98.8	1.0	100.0	0.1	102.0				
B_{18}	1.1	99.6	0.3	100.0	0.1	102.0				
B_4	8.3	92.1	2.3	98.7	0.8	99.5				
B_{14}	6.3	93.8	1.8	99.7	0.6	100.0				
B_{13}	6.4	93.5	1.8	100.0	0.6	100.0				
B_{15}	2.7	97.3	0.7	100.0	0.3	100.0				
B_5	19.8	85.6	5.6	98.3	2.0	99.6				
B_6	16.3	86.5	4.6	98.8	1.6	100.0				
B_7	52.1	76.6	11.8	96.5	4.2	98.3				
B_8	30.5	81.7	8.6	97.0	3.1	102.0				
B_9	12.6	95.4	3.5	100.0	1.3	100.0				
B_{11}	9.8	90.1	2.8	99.6	0.1	98.0				

表 1 点 F_1 故障时各母线序电压计算结果 Tab. 1 Calculation results of sequence voltage of buses with F_1 fault

表 2	点 F ₂ 故障时各母线序电压计算结果
Tab. 2	Calculation results of sequence voltage
	of buses with F_2 fault

四建								
马线 -	$K_{(2)}(\mathrm{BC})$	$K_{(0)}$ (BCG)	$K_{(1)}(ABC)$					
B_2	14.5	4.6	74.6					
B_3	25.8	20.4	50.4					
B_{18}	19.1	3.0	64.2					
B_4	39.5	32.1	20.5					
B_{14}	26.2	16.9	48.3					
B_{13}	19.5	9.4	60.1					
B_{15}	15.9	7.2	69.3					
B_5	20.4	9.8	60.6					
B_{6}	15.8	6.0	68.6					
B_7	15.9	6.7	66.6					
B_8	16.0	7.1	66.3					
B_9	6.6	2.9	89.0					
B_{11}	15.9	6.0	68.7					

表 3	,片	ξ F 1	和	F_2	故障	討	5日	线	序电	压ì	†算结果	f
T	ſab. :	3 (Calc	ula	tion	resu	lts o	of s	eque	nce	voltage	
		0	f bı	ises	wit	h F.	and	I F	, fai	ilts		

四种	序电压比例系数/%					
马线 -	$K_{(1)}$	<i>K</i> ₍₂₎	$K_{(0)}$			
B_2	87.1	12.5	0.8			
B_3	72.6	22.3	3.7			
B_{18}	80.4	16.2	1.1			
B_4	52.4	32.1	8.2			
B_{14}	67.5	19.6	6.2			
B_{13}	72.9	13.1	6.3			
B_{15}	81.4	12.3	2.6			
B_5	65.9	5.8	19.7			
B_6	70.5	3.0	16.2			
B_7	60.5	6.9	41.9			
B_8	65.4	2.5	30.4			
B_9	88.7	1.0	12.5			
B_{11}	73.9	5.7	9.8			

由表1可知,在点 F_1 发生金属性接地故障时保 护判据的灵敏度较高,高定值判据启动的母线为 B_7 , B_8 , B_5 , B_6 , B_9 ,较容易识别故障区域;随着接地 电阻的增加,正序电压升高,零序电压降低,灵敏度 均下降,在接地电阻为 300 Ω 时,仅母线 B_7 和 B_8 的零序电压低定值判据动作,正序电压判据已不能 识别故障区域,结合辅助故障区域和零序电压排序 确定的区域可识别故障区域。

由表 2 可知,在系统发生相间故障时基于故障 序电压特点的排序能很快得出疑似故障母线 B_4 , B_3 , B_{14} , B_5 。

由表3可知,在系统复故障时,正序、负序、零序 电压排序结果均不相同,根据复故障保护区域形成 原则划分为1个故障区域。仿真结果如图4所示。

从图 4 可以看出, F₁ 故障时保护区域为区域 Ⅰ, F₂ 故障时保护区域为区域 Ⅱ, F₁ 和 F₂ 复故障 时保护区域为区域 Ⅲ。相比 IEEE 39 节点系统故 障区域明显减小,通信量也相对降低,有利于广域继 电保护系统的实现。



图 4 自适应识别故障区域图 Fig. 4 Results of adaptive identification region

4 结语

大范围、实时性的信息要求给广域继电保护的 工程实现带来困难,为降低系统的通信量,本文提出 了预先识别出故障区域的原则和实现方法。

1)分析电网故障时序电压分布特点,讨论了短 线路、复故障、高阻接地等因素对故障序电压分布的 影响。

2)基于故障序电压排序的疑似故障区域分析, 提出了自适应识别广域继电保护系统的故障区域, 并利用图论技术实现了自适应识别方法。

附录见本刊网络版(http://aeps.sgepri.sgcc. com.cn/aeps/ch/index.aspx)。

- 19 -

参 考 文 献

- [1] 徐慧明,毕天妹,黄少锋,等. 基于广域同步测量系统的预防连锁 跳闸控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):32-38.
 XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. Study on wide area measurement system based control strategy to prevent cascading trips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 32-38.
- [2] ADAMIAK M G, APOSTOLOV A P, BEGOVIC M M, et al. Wide area protection technology and infrastructures [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 601-609.
- [3] 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.

- [4] ZHANG Dahai, BI Yanqiu. Communication network of wide area protection system using OPNET simulator [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, July 5-8, 2009, Seoul, Korea: 1298-1303.
- [5] 徐天奇,尹项根,游大海,等.3 层式广域保护系统通信网络[J]. 电力系统自动化,2008,32(16):28-33.
 XU Tianqi, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Communication network for three-level wide area protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 28-33.
- [6] 熊小伏,吴玲燕,陈星田.满足广域保护通信可靠性和延时要求的路由选择方法[J].电力系统自动化,2011,35(3):44-48. XIONG Xiaofu, WU Lingyan, CHEN Xingtian. Routing selection for wide-area protection based on communication reliability and time-delay requirement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 44-48.
- [7] 王晓茹, HOPKONSON K M, THORP J S,等.利用 Agent 实现 新的电网后备保护[J].电力系统自动化,2005,29(21):57-63.
 WANG Xiaoru, HOPKONSON K M, THORP J S, et al. Novel backup protection system for the electric power grid using agent [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21):

57-63.

- [8] CONG W, PAN Z C, ZHAO J G, et al. A wide area protection system and division of protection IED associated area based on Petri net[C]// Proceedings of 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, August 18, 2005, Dalian, China: 1-7.
- [9] 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):48-51.
 LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A study of zone division on limited wide area protection system[J].
 Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 48-51.
- [10] EISSA M M, MASOUD M E, ELANWAR M M M. A novel back up wide area protection technique for power transmission grids using phasor measurement unit[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(1): 270-278.
- [11] 汪旸,尹项根,赵逸君,等. 基于遗传算法的区域电网智能保护
 [J].电力系统自动化,2008,32(17):40-44.
 WANG Yang, YIN Xianggen, ZHAO Yijun, et al. Regional power network intelligent protection based on genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 40-44.
- [12] 苗世洪,刘沛,林湘宁,等. 基于数据网的新型广域后备保护系统实现[J]. 电力系统自动化,2008,32(10):32-36.
 MIAO Shihong, LIU Pei, LIN Xiangning, et al. A new type of backup protective system in wide area network based on data network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 32-36.

李振兴(1977—),男,通信作者,博士研究生,主要研究 方向:电力系统继电保护与控制、电力系统人工智能技术。 E-mail: lzx2007001@163.com

尹项根(1954—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统继电保护、变电站自动化及安全稳定控制。

张 哲(1962—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统继电保护及自动控制。

An Adaptive Identification Method of Fault Region for Wide Area Protection

LI Zhenxing^{1,2}, YIN Xianggen^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2}, WANG Yuxue¹, TANG Jinrui²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science

and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Electric Power Security and High Efficiency Laboratory,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to reduce communication traffic of wide area protection (WAP), adaptive identification rule and its realization method for WAP are proposed. The effects of short line circuit, complex faults and high resistance grounding on sequence voltage distribution are discussed, combining sequence voltage distribution characteristics when fault occurs. Various bus sequence voltages in the wide power grid area are real-time monitored and ranking calculated by expert system, and fault region is analyzed on the basis of ranking results so as to realize the adaptive identification fault region. Communication traffic is dramatically reduced when system only communicates with intelligent electronic devices (IEDs) in the fault region. Different from the past WAP fixed partition, the method of adaptive identification of fault region for WAP is easier to get high sensitivity fault signal by monitoring the sequence voltage identification fault region of startup buses, meanwhile, the method is immune to structure change of power system. The simulation experiment verifies the validity of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877031, No. 50837002).

Key words: wide area protection; fault region; self-adaption; sequence voltage; graph theory

附录 A 电力系统故障时序电压分布特点

在电网发生短路故障时,各点序电压分布情况:电源点的正序电压最高,随着对短路点的接近,正序 电压降逐渐降低;短路点的负序和零序电压最高,离短路点愈远,节点的负序电压和零序电压就愈低,电 源点的负序电压和零序电压为零,如遇 YN,d 接法的变压器,零序电压在变压器三角形一侧的出线端已 经降至零了。以文中图1所示的一个简单广域输电网络为例分析序电压分布特点。

系统在 *F*₁ 点发生故障时,以负序电压分布为例,其分布图如附图 A(a)所示;在 *F*₂ 点发生故障时,其 负序电压分布图如图 A1 (b)所示;在 *F*₁ 点发生故障,又发生 *F*₂ 点复故障时,其负序电压分布如图 A1 (c) 所示。



由图 A1 可知,在系统发生简单故障时,序电压分布特点较为明显。但对于特殊的系统结构或发生复故障时,序电压分布特点变得较为复杂。

1)图 1 所示系统,线路 L₃较短,在 L₃区外 F₁ 点发生故障时,母线 U₃与 U₄的序电压较为接近,受测 量误差和计算误差的影响,母线 U₄的正序电压可能低于母线 U₃的正序电压,其负(零)序电压可能高于 U3 的负(零)序电压,与序电压分布特点不相符合。

2)附图 A1(c)所示,系统发生复故障时,各母线电压受多点故障电压分量的影响,远离故障点的母线 正序电压比近故障点的母线可能更低,负(零)序电压比近故障点的母线可能更高,与序电压分布特点不相 符合。

3)系统发生高阻接地故障时,各母线序电压变化相对较小,由电压量构成的保护判据可能会遇到灵敏 度不足的问题。

4)正序网络、负序网络和零序网络受系统电源、变压器接地等因素的影响存在差别,系统故障时各母 线序电压的分布与排序并不完全一致。 附录 B



图 B1 故障区域识别流程图 Fig.B1 Flowchart of fault region identification