

基于稀疏矩阵的煤矿电网过流保护检验算法^{*}

王新良 靳翔 杨茜惠

(河南理工大学 电气工程与自动化学院 焦作 454003)

摘要: 为了避免矿井高压电网在实际运行过程中可能会出现越级跳闸或保护拒动现象,保证矿井高压电网供电安全,本文基于矿井高压供电网络特点,提出了一种基于稀疏矩阵的矿井高压电网过流保护检验算法,将稀疏矩阵和矿井高压过流保护检验算法相结合,获得支路节点和支路节点的供电关系矩阵,描述了故障电流计算方法,并以此为基础获得了最终需要执行跳闸操作的开关矩阵,对矿井高压供电系统图中相应开关执行跳闸操作。依据开关跳闸结果,即可判断出当前的过流保护设置是否合理。

关键词: 过流保护;检验算法;稀疏矩阵;越级跳闸;保护拒动

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:**

Testing algorithm of overcurrent protection in coal mine high-voltage grid based on sparse matrix

Wang Xinliang Jin Xiang Yang Qianhui

(School of Electric Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to avoid override trip or protection re-closure in practical running process and ensure power supply safety of coal mine high-voltage grid, this paper gives a testing algorithm of overcurrent protection in coal mine high-voltage grid based on sparse matrix, it combines overcurrent protection testing algorithm and sparse matrix, obtains power supply relationship matrix between branch nodes, gives computing methods of fault current, acquires final switch matrix that needs to execute trip operation, and executes trip operation for corresponding switch in coal mine high-voltage grid diagram. According to consequence of switch trip, it can determine whether present overcurrent protection setting is reasonable or not.

Keywords: overcurrent protection; testing algorithm; sparse matrix; override trip; protection re-closure

1 引言

过电流是威胁煤矿安全生产的主要原因之一,由于煤矿井下供电系统结构复杂,传统的三段式保护由于井下三级高压线路相距较短,使得各段短路电流幅值相差较小,时限设定受上级供电部门继电保护时限的约束,故不能构成有效的纵向选择性过流保护系统,因此经常出现越级跳闸^[1-3]。文献[4-5]提出的自适应控制的定值整定方案,可以自动修改继电保护的整定值来提高过流保护装置的可靠性和灵敏性。文献[6-7]实现了电网继电保护整定计算功能,但不能用来检验保护定值设置是否合理。文献[8-9]主要是通过仿真校验判断地面电网继电保护定值的选择性和可靠性是否满足要求,地面电网属于复杂环式供电网络,故

障仿真模型较为复杂,与矿井高压电网的网络结构存在较大差别。文献[10]提出的井下高压电网保护定值校验仿真方法,采用广度优先算法,可以有效提高保护定值的可靠性。

地面电网属于复杂环式供电网络,而矿井高压供电网络一般使用两个电源,并且这两个电源采用分列运行方式,或者是一路使用一路备用,属于单电源开式电网,为辐射形树状网络结构。本文基于矿井高压供电网络特点,使用稀疏矩阵代替关联矩阵进行网络拓扑分析,将稀疏矩阵和矿井高压过流保护检验算法相结合,提出了一种基于稀疏矩阵的矿井高压电网过流保护设置(速断保护设置和定时过流保护设置)检验算法,通过获得支路节点和支路节点的供电关系矩阵构造矿井高压供电系统的网络拓扑模型,能够

收稿日期:2016-03

^{*} 基金项目:国家自然科学基金青年基金(61405055)资助项目

很方便地完成矿井高压供电系统供电网络的拓扑辨识,给出了故障电流矩阵,描述了故障电流计算方法,并以此为基础获得了最终需要执行跳闸操作的开关矩阵,对矿井高压供电系统图中相应开关执行跳闸操作。依据开关跳闸结果,即可判断出当前的过流保护设置是否合理。

2 基于稀疏矩阵的矿井高压电网拓扑自学习模型

2.1 矩阵运算定义

在稀疏矩阵中使用三元组 (i, j, k) 方式描述矩阵中的非零元素, i, j, k 分别为该非零元素的行号、列号和数值。默认情况下,矩阵元素与矩阵元素乘法运算为二进制与运算,元素与元素的加法运算为二进制或运算,二进制稀疏矩阵乘法运算具体过程如下:

1) 假定稀疏矩阵 $C = N_B \cdot N_A$, N_B 为 n 行 m 列, N_A 为 m 行 n 列, 则 C 为 n 行 n 列;

2) 从稀疏矩阵 N_B 中任意取出 1 个元素;

3) 该元素在 N_B 中用三元组 $(i, a, 1)$ 表示, 行号为 i , 列号为 a ; 在稀疏矩阵 N_A 中查找行号为 a 的所有三元组元素, 对查找到得的所有三元组元素将其行号 a 用 i 代替后, 全部添加到矩阵 C 中;

4) 如果 N_B 中仍然有三元组元素未被遍历, 则从 N_B 中取出下一个没有被遍历的三元组元素, 重复执行步骤 3); 如果 N_B 中所有元素均被遍历, 执行步骤 5);

5) 针对稀疏矩阵 C 中行号、列号和数值相同的三元组只保留 1 个, 其余重复的全部从 C 中删除, 最终得到的稀疏矩阵 C 即是二进制稀疏矩阵乘法运算的结果, 乘法运算执行完成。

2.2 拓扑分析模型

依据矿井高压供电系统供电关系, 生成母线节点和支路节点的稀疏矩阵 A 和 B ; 针对矿井高压供电系统, 以变电所母线为母线节点、以高压开关连接的支路作为支路节点, 如果母线节点有 m 个, 支路节点有 n 个, 则依据矿井高压供电系统图中电气设备之间的连接关系生成母线节点和支路节点的稀疏矩阵 A (m 行 n 列, 以母线节点顺序号为行号, 以支路节点顺序号为列号) 和稀疏矩阵 B (n 行 m 列, 以支路节点顺序号为行号, 以母线节点顺序号为列号), 矩阵 A 和 B 中大部分元素为 0, 均为稀疏矩阵。

在生成稀疏矩阵 A 的过程中, 如果第 i 行的行号 i 对应的母线节点由第 j 列的列号对应的支路节点供电, 则在稀疏矩阵 A 中增加对应的三元组元素 $(i, j, 1)$; 在生成稀疏矩阵 B 的过程中, 如果第 i 行的行号 i 对应的支路节点由第 j 列的列号对应的母线节点供电, 则在稀疏矩阵 B 中增加对应的三元组元素 $(i, j, 1)$ 。

2.2.1 基于开关状态的母线节点和支路节点的稀疏矩阵 N_A

依据稀疏矩阵 A 和开关状态矩阵 S 生成稀疏矩阵

N_A , 具体步骤如下: 依据支路节点上高压开关的开闭状态, 生成支路节点开关状态矩阵 S , S 包含 n 个元素, $S = [S_1 \ S_2 \ \dots \ S_i \ \dots \ S_n]$, $1 \leq i \leq n$, 在 S 中, 第 i 个元素对应的开关状态闭合, 则 $S_i = 1$, 反之, 则 $S_i = 0$, 矩阵 O_s 的数值和矩阵 S 相同; 从 S 中任意取出一个元素; 该元素在 S 中的序号用 i 表示, 如果 $S_i = 1$, 则稀疏矩阵 A 中对应列号为 i 的所有三元组元素全部添加到稀疏矩阵 N_A 中; 如果 S 中仍然有元素未被遍历, 则从 S 中取出下一个没有被遍历的元素, 重复执行上述步骤。

2.2.2 基于开关状态的母线节点和支路节点的稀疏矩阵 N_B

依据稀疏矩阵 B 和开关状态矩阵 S 生成稀疏矩阵 N_B , 具体步骤如下: 从 S 中任意取出 1 个元素; 该元素在 S 中的序号用 i 表示, 如果 $S_i = 1$, 则稀疏矩阵 B 中对应的行号为 i 的所有三元组元素全部添加到稀疏矩阵 N_B 中; 如果 S 中仍然有元素未被遍历, 则从 S 中取出下一个没有被遍历的元素, 重复执行上述步骤。

2.2.3 供电关系矩阵 G

依据单向图的连通性和二进制稀疏矩阵乘法运算的计算方法, 由稀疏矩阵 N_A 、稀疏矩阵 N_B 和开关状态矩阵 S 计算支路节点与支路节点供电关系矩阵 G (n 行 n 列); 在矩阵 G 中可以描述某支路节点是由哪些支路节点供电的, 如果第 i 行的支路节点 i 由第 j 列的支路节点 j 供电, 则 $G_{ij} = 1$, 反之则 $G_{ij} = 0$; 供电关系矩阵 $G =$

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1j} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2j} & \dots & G_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{i1} & G_{i2} & \dots & G_{ij} & \dots & G_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & G_{nj} & \dots & G_{nn} \end{bmatrix} \text{。生成最终供电关系矩阵 } G$$

的具体计算步骤如下:

依据单向图的连通性, 将稀疏矩阵 N_B 和稀疏矩阵 N_A 做二进制稀疏矩阵乘法运算, 得到原始的第 1 级支路节点与支路节点供电关系矩阵 C , 稀疏矩阵 $C = N_B \cdot N_A$, 为 n 行 n 列; 因为采用的是单向图结构, 所以在计算获得的支路节点与支路节点供电关联矩阵 C 中, 支路节点 i 与支路节点 i 之间的供电关系未能得到正确反映; 因此对获得的供电关系矩阵 C 需要进行修正, 将矩阵 C 中所有元素加入到矩阵 N_C 中, N_A 为 n 行 n 列, 针对矿井高压电网中的每一个支路节点, 如果支路节点 i 对应的开关状态 $S_i = 1$, 则在稀疏矩阵 N_C 中添加元素 $(i, i, 1)$; 将矩阵 N_C 和自身做二进制稀疏矩阵乘法运算, 得到一个新的稀疏矩阵 D , 且 $D = N_C \cdot N_C$; 比较矩阵 D 和矩阵 N_C 是否发生变化, 如果发生变化, 则用矩阵 D 替换矩阵 N_C , 反之, 如果 D 和 N_C 相同, 则计算所得的矩阵 D 即是支路节点与支路节点供电关系矩阵 N_E , N_E 为 n 行 n 列的稀疏矩阵; 将稀疏矩阵 N_E 还原成对应的二维矩阵 E , 其第 i 行第 j 列的元素用 E_{ij} 表示, 则

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1j} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2j} & \cdots & E_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{i1} & E_{i2} & \cdots & E_{ij} & \cdots & E_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \cdots & E_{nj} & \cdots & E_{nn} \end{bmatrix}$$

设置矿井高压供电系统的电源支路节点,电源支路节点是指由上级供电部门直接供电的支路节点;电源支路节点矩阵用 \mathbf{L} (n 行 1 列) 表示, $\mathbf{L}^T = [L_1 \ L_2 \ \cdots \ L_i \ \cdots \ L_n]$,

其中 $L_i = \begin{cases} 1, & \text{如果支路节点 } i \text{ 是电源支路节点} \\ 0, & \text{如果支路节点 } i \text{ 不是电源支路节点} \end{cases}, 1 \leq i \leq n$;

矩阵 \mathbf{F} (n 行 1 列) 表示存在电源供电的节点集合矩阵, $\mathbf{F}^T = [F_1 \ F_2 \ \cdots \ F_i \ \cdots \ F_n]$, $1 \leq i \leq n$ 。 $F_i = 1$ 表示其对应的支路节点存在电源供电, $F_i = 0$ 表示其对应的支路节点没有电源供电, i 对应该支路节点的顺序号,

$\mathbf{F} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{L}$, 且 $F_i = \sum_{k=1}^n E_{ik} L_k$; 将矩阵 \mathbf{E} 中每行的 n 个元素和矩阵 \mathbf{F} 中的每个元素进行与运算后得到支路节点和支路节点供电关系的最终关系矩阵 \mathbf{G} (n 行 n 列),

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} E_{11}F_1 & E_{12}F_1 & \cdots & E_{1j}F_1 & \cdots & E_{1n}F_1 \\ E_{21}F_2 & E_{22}F_2 & \cdots & E_{2j}F_2 & \cdots & E_{2n}F_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{i1}F_i & E_{i2}F_i & \cdots & E_{ij}F_i & \cdots & E_{in}F_i \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{n1}F_n & E_{n2}F_n & \cdots & E_{nj}F_n & \cdots & E_{nn}F_n \end{bmatrix}$$

由最终的支路节点与支路节点供电关系矩阵 \mathbf{G} 可知支路节点与支路节点之间的供电关系,为矿井高压电网的过流保护设置仿真检验提供了网络拓扑分析模型。

3 矿井高压电网过流保护设置检验

在某条线路发生短路故障时,依据最终的支路节点与支路节点供电关系矩阵 \mathbf{G} , 计算所有高压开关相应的故障电流,并在此基础上依据供电关系矩阵 \mathbf{G} 获得因短路故障需要执行跳闸操作的开关矩阵 \mathbf{T}_O , 依据开关矩阵 \mathbf{T}_O 在高压供电系统图上将相应开关的状态修改为分闸,执行跳闸操作,完成矿井高压电网过流保护设置检验。

在矿井高压电网中,针对某支路节点直接供电的线路设置故障点,并对该故障点设置相应的故障类型。如果该故障点故障类型为二相短路,则故障点短路电流为最小两相短路电流;如果该故障点故障类型为三相短路,则故障点短路电流为最大三相短路电流。假定该故障点的故障电流为 I_D , 在发生该故障后,矿井高压电网中所有高压开关支路节点对应的故障电流矩阵为 $\mathbf{F}^T = [F_{11} \ F_{12} \ \cdots \ F_{Tj} \ \cdots \ F_{1n}]$, 其中 $1 \leq j \leq n$; 如果第 i 个支路节点控制的线路发生了短路故障,则依据支路节点 i 在供电关系矩阵 \mathbf{G} 中对应的行号查找到相应的行 G_i , $G_i = [E_{i1}F_i \ E_{i2}F_i \ \cdots \ E_{ij}F_i \ \cdots \ E_{in}F_i]$, 其中 $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$, 则由此可得:

$$F_{ij} = \begin{cases} I_D, & \text{if } E_{ij}F_i = 1 \\ 0, & \text{if } E_{ij}F_i = 0 \end{cases}$$

高压开关支路节点对应的速断定值矩阵为 \mathbf{S}_D , $\mathbf{S}_D = [S_{D1} \ S_{D2} \ \cdots \ S_{Dj} \ \cdots \ S_{Dn}]$, 其中 $1 \leq j \leq n$; 高压开关支路节点对应的定时过流定值矩阵为 \mathbf{D}_D , 定时过流延时矩阵为 \mathbf{T}_D , $\mathbf{D}_D = [D_{D1} \ D_{D2} \ \cdots \ D_{Dj} \ \cdots \ D_{Dn}]$, $\mathbf{T}_D = [T_{D1} \ T_{D2} \ \cdots \ T_{Dj} \ \cdots \ T_{Dn}]$, 其中 $1 \leq j \leq n, T_{Dj} \geq 0$ 。

由以上得出故障电流和速断定值比较矩阵 $\mathbf{C}_T = [C_{T1} \ C_{T2} \ \cdots \ C_{Tj} \ \cdots \ C_{Tn}]$, 其中, $C_{Tj} = S_{Dj} - F_{ij}, 1 \leq j \leq n$; 矩阵 \mathbf{F}_I 、 \mathbf{S}_D 和 \mathbf{C}_T 之间元素与元素的数学计算采用十进制算术运算; 由故障电流和速断定值比较矩阵可得当前因故障电流需要跳闸的高压开关矩阵 $\mathbf{T}_T = [T_{T1} \ T_{T2} \ \cdots \ T_{Tj} \ \cdots \ T_{Tn}]$, $T_{Tj} = \begin{cases} 0, & \text{if } C_{Tj} < 0 \\ 1, & \text{if } C_{Tj} \geq 0 \end{cases}$

当前的开关状态矩阵 $\mathbf{T}_S = [T_{S1} \ T_{S2} \ \cdots \ T_{Sj} \ \cdots \ T_{Sn}]$, 其中 $T_{Sj} = T_{Tj} \cdot S_j, 1 \leq j \leq n$; 在现场环境中,如果某开关跳闸,则由该开关供电的所有下级开关也要全部跳闸。将 T_S 作为最新的高压开关状态,然后将 S 的数值设置为 T_S , 使用基于稀疏矩阵的矿井高压电网拓扑分析模型,重新计算最终的支路节点与支路节点供电关系矩阵 \mathbf{G} 。假定矩阵 $\mathbf{W} = [W_1 \ W_2 \ \cdots \ W_j \ \cdots \ W_n]$, 其中 $W_i = 1, 1 \leq i \leq n$; 因速断保护检验引起的相应开关跳闸后,所有高压开关状态矩阵 $\mathbf{F}_S^T = \mathbf{G} \times \mathbf{W}^T = [F_{S1} \ F_{S2} \ \cdots \ F_{Sj} \ \cdots \ F_{Sn}]$ 依据供电关系矩阵 \mathbf{G} 和发生短路故障的支路节点位置重新计算故障电流矩阵 \mathbf{F}_I 。

得出故障电流和定时过流定值比较矩阵 $\mathbf{C}_M = [C_{M1} \ C_{M2} \ \cdots \ C_{Mi} \ \cdots \ C_{Mn}]$, 其中, $C_{Mj} = D_{Dj} - F_{ij}, 1 \leq j \leq n$; 矩阵 \mathbf{F}_I 、 \mathbf{D}_D 和 \mathbf{C}_M 之间元素与元素的数学计算采用十进制算术运算; 由故障电流和定时过流定值比较矩阵可得矩阵 $\mathbf{T}_M = [T_{M1} \ T_{M2} \ \cdots \ T_{Mj} \ \cdots \ T_{Mn}]$,

$$T_{Mj} = \begin{cases} 0, & \text{if } C_{Mj} < 0 \\ 1, & \text{if } C_{Mj} \geq 0 \end{cases}$$

矩阵 $\mathbf{T}_N = [T_{N1} \ T_{N2} \ \cdots \ T_{Nj} \ \cdots \ T_{Nn}]$, 如果 $T_{Mi} = 0$, 并且 $F_{Sj} = 1$, 则 $T_{Nj} = 1$; 否则 $T_{Nj} = 0, 1 \leq j \leq n$ 。如果 \mathbf{T}_N 中所有元素为 0, 判定过流保护设置是否合理; 如果 \mathbf{T}_N 中存在非零元素, 则针对 \mathbf{T}_N 中所有数值为 1 的元素, 依据其序号在矩阵 \mathbf{T}_D 中查找其对应的延时时间, 假定在 \mathbf{T}_N 中数值为 1 且对应延时时间最小的元素为 T_{Nj} , 且 $T_{Nj} = 1$, 则设置 $T_{Dj} = 0, F_{Sj} = 0$ 。

将 S 的数值设置为 F_S^T , 基于稀疏矩阵的矿井高压电网拓扑分析模型,重新计算最终的支路节点与支路节点供电关系矩阵 \mathbf{G} , 依据供电关系矩阵 \mathbf{G} 和发生短路故障的支路节点位置重新计算故障电流矩阵 \mathbf{F}_I 。假定矩阵 $\mathbf{W} = [W_1 \ W_2 \ \cdots \ W_j \ \cdots \ W_n]$, 其中 $W_i = 1, 1 \leq i \leq n$; 依据供电关联矩阵 \mathbf{G} 重新计算所有高压开关状态

$$\mathbf{F}_S^T = \mathbf{G} \times \mathbf{W}^T = [F_{S1} \ F_{S2} \ \cdots \ F_{Sj} \ \cdots \ F_{Sn}]$$

最终需要执行跳闸操作的开关矩阵 $\mathbf{T}_O = [T_{O1} \ T_{O2}$

$\dots T_{oi} \dots T_{on}] = O_s - F_s, 1 \leq i \leq n$, 由矩阵 O_s 、 F_s 计算矩阵 T_o 时采用十进制算术运算; 遍历开关矩阵 T_o 中的每个元素, 如果 $T_{oi} = 1$, 则在高压供电系统图上将第 i 个支路节点对应的高压开关执行跳闸操作; 如果 $T_{oi} = 0$, 则第 i 个支路节点对应的高压开关不动作, 开关状态保持不变; 依据矿井高压供电系统图中高压开关跳闸结果, 即可判断出当前的过流保护设置是否合理。

4 仿真实证

假定图 1 所示的矿井高压电网中每个支路节点对应的高压开关设置了速断保护和定时过流保护, 提出的基于稀疏矩阵的过流保护设置检验方法针对图 1 所示的矿井高压电网完成过流保护设置检验, 在矿井高压供电系统图中, 假定用黑色填充的支路节点为分闸状态, 未填充的支路节点为合闸状态, 母线节点编号和支路节点编号如图 1 所示。

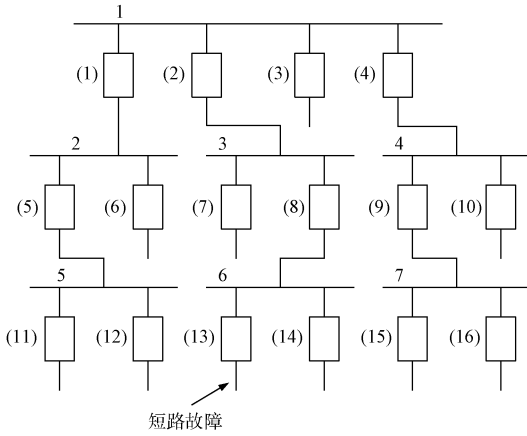


图 1 矿井高压供电系统

具体步骤如下:

计算稀疏关联矩阵 A 和 B , $A = \{(2,1,1), (3,2,1), (4,4,1), (5,5,1), (6,8,1), (7,9,1)\}$; $B = \{(1,1,1), (2,1,1), (3,1,1), (4,1,1), (5,2,1), (6,2,1), (7,3,1), (8,3,1), (9,4,1), (10,4,1), (11,5,1), (12,5,1), (13,6,1), (14,6,1), (15,7,1), (16,7,1)\}$;

计算开关闭合状态 S , $S = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$;

计算矩阵 N_A 和 N_B , $N_A = \{(2,1,1), (3,2,1), (4,4,1), (5,5,1), (6,8,1), (7,9,1)\}$; $N_B = \{(1,1,1), (2,2,1), (3,1,1), (4,1,1), (5,2,1), (6,2,1), (7,3,1), (8,3,1), (9,4,1), (10,4,1), (11,5,1), (12,5,1), (13,6,1), (14,6,1), (15,7,1), (16,7,1)\}$;

计算稀疏矩阵 C , $C = \{(5,1,1), (6,1,1), (7,2,1), (8,2,1), (9,4,1), (10,4,1), (11,5,1), (12,5,1), (13,8,1), (14,8,1), (15,9,1), (16,9,1)\}$;

计算稀疏矩阵 N_C , $N_C = \{(1,1,1), (2,2,1), (3,3,1), (4,4,1), (5,1,1), (5,5,1), (6,1,1), (6,6,1), (7,2,1), (7,7,1), (8,2,1), (8,8,1), (9,4,1), (9,9,1), (10,4,1), (10,10,1), (11,5,1), (11,11,1), (12,5,1), (12,12,1), (13,8,1), (13,13,1), (14,8,1), (14,14,1), (15,9,1), (15,15,1), (16,9,1), (16,16,1)\}$;

$(1), (7,7,1), (8,2,1), (8,8,1), (9,4,1), (9,9,1), (10,4,1), (10,10,1), (11,5,1), (11,11,1), (12,5,1), (12,12,1), (13,8,1), (13,13,1), (14,8,1), (14,14,1), (15,9,1), (15,15,1), (16,9,1), (16,16,1)\}$;

计算稀疏矩阵 D , $D = \{(1,1,1), (2,2,1), (3,3,1), (4,4,1), (5,1,1), (5,5,1), (6,1,1), (6,6,1), (7,2,1), (7,7,1), (8,2,1), (8,8,1), (9,4,1), (9,9,1), (10,4,1), (10,10,1), (11,1,1), (11,5,1), (11,11,1), (12,1,1), (12,5,1), (12,12,1), (13,2,1), (13,8,1), (13,13,1), (14,2,1), (14,8,1), (14,14,1), (15,9,1), (15,15,1), (16,4,1), (16,9,1), (16,16,1)\}$;

计算稀疏矩阵 N_E , $N_E = \{(1,1,1), (2,2,1), (3,3,1), (4,4,1), (5,1,1), (5,5,1), (6,1,1), (6,6,1), (7,2,1), (7,7,1), (8,2,1), (8,8,1), (9,4,1), (9,9,1), (10,4,1), (10,10,1), (11,1,1), (11,5,1), (11,11,1), (12,1,1), (12,5,1), (12,12,1), (13,2,1), (13,8,1), (13,13,1), (14,2,1), (14,8,1), (14,14,1), (15,4,1), (15,9,1), (15,15,1), (16,4,1), (16,9,1), (16,16,1)\}$;

计算矩阵 L 和 F , 假定在图 1 所示的矿井高压电网中, 电源支路节点是 $\{(1), (2), (3), (4)\}$, 则 $L^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, 矩阵 $F^T = (E \cdot L)^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$;

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

计算故障电流矩阵 F_I , 假定所设置的发生两相短路的故障点对应的支路节点在矩阵 G 中的行号为 13, 则矿井高压电网中高压开关支路节点对应的故障电流矩阵 $F_I = [0 \ I_D \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_D \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_D \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$;

速断定值矩阵 $S_D = [S_{D1} \ S_{D2} \ \dots S_{Dj} \ \dots S_{Dn}]$, $S_{Dj} > 0$;

故障电流比较矩阵 $C_T = [S_{D1} S_{D2} \dots S_{Dn} \dots S_{D1} S_{D3} S_{D4} S_{D5} S_{D6} S_{D7} S_{D8} \dots I_D S_{D9} S_{D10} S_{D11} S_{D12} S_{D13} \dots$

$I_D S_{D14} S_{D15} S_{D16}$], 假定 $S_{D2} > I_D$, $S_{D8} > I_D$, $S_{D13} > I_D$;

需要跳闸的高压开关矩阵 $T^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$;

跳闸后的开关状态 $T_S = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$;

依据新的开关状态 T_S 重新计算关系矩阵 G ,

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

计算开关跳闸后所有高压开关的最终状态矩阵

$$F_S^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1];$$

依据供电关系矩阵 G 和发生短路故障的支路节点位置重新计算故障电流矩阵 F_I , $F_I = [0 \ I_D \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_D \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_D \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$

高压开关支路节点对应的定时过流定值矩阵为 D_D , 定时过流延时矩阵为 T_D , $D_D = [D_{D1} \ D_{D2} \ \dots D_{Dj} \ \dots D_{D16}]$, $T_D = [0.75 \ 0.75 \ 0.75 \ 0.75 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25]$;

计算故障电流比较矩阵 $C_M = [D_{D1} D_{D2} - I_D D_{D3} D_{D4} D_{D5} D_{D6} D_{D7} D_{D8} - I_D D_{D8} D_{D10} D_{D11} D_{D12} D_{D13} - I_D D_{D14} D_{D15} D_{D16}]$, 假定 $D_{D2} > I_D$, $D_{D8} < I_D D_{D13} < I_D$;

计算矩阵 $T_M = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]$;

$T_N = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$;

计算状态矩阵 F_S 和延时矩阵 T_D , $F_S^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$, $T_D = [0.75 \ 0.75 \ 0.75 \ 0.75 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25]$;

设置 $S = F_S^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, 依据 S 重新计算矩阵 G 和最终高压开关状态 F_S , $F_S^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1$

$1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]$, $G =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

依据供电关系矩阵 G 和发生短路故障的支路节点位置重新计算故障电流矩阵 F_I ,

$$F_I = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

计算矩阵 $T_N = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, 由 T_N 可知, F_S 即为矿井高压电网中高压开关的最终状态;

计算最终需要执行跳闸操作的开关矩阵 T_O , $T_O = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0];$ 则最终需要执行跳闸操作的是支路节点 13. 需要将此支路节点的开关状态修改为分闸, 检验结果如图 2 所示, 实现了瞬时速断和定时过流定值检验; 由此可知, 基于稀疏矩阵的矿井高压电网过流保护设置检验方法能够有效实现矿井高压电网过流保护设置检验. 依据获得的检验结果即可判断当前的过流保护设置是否满足可靠性和选择性要求, 达到过流保护设置检验的目的.

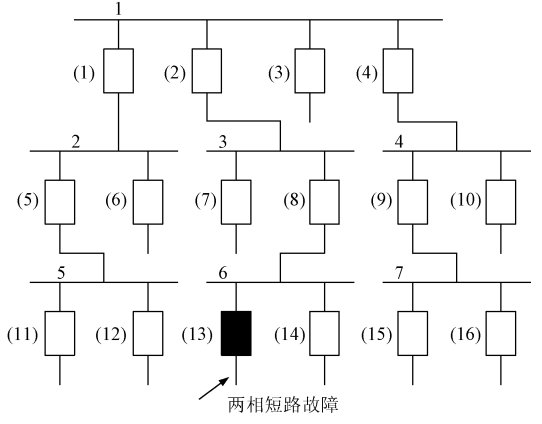


图 2 开关(13)分闸下矿井高压供电系统

5 结 论

本文提出的一种基于稀疏矩阵的矿井高压电网过流保护设置检验方法,主要包括如下步骤:依据母线节点和支路节点稀疏矩阵 A 和 B , 及开关状态矩阵 S , 计算支路节点与支路节点供电关系矩阵 G ; 由矩阵 G 计算所有开关相应的故障电流,并在此基础上获得因短路故障需要执行跳闸操作的开关集合,对其执行跳闸操作。本文基于矿井高压供电网络特点,将稀疏矩阵和矿井高压过流保护设置检验方法相结合,获得支路节点和支路节点的供电关系矩阵,描述了故障电流计算方法,并以此为基础获得了最终需要执行跳闸操作的开关矩阵,对矿井高压供电系统图中相应开关执行跳闸操作。依据开关跳闸结果,即可判断出当前的过流保护设置是否合理。

参考文献

- [1] 李佑光,林东. 电力系统继电保护原理及新技术[M]. 北京:科学出版社,2009:45-58, 157-171.
- [2] 马星河,李林蔚,李自强,等. 煤矿井下高压电网过流保护整定计算方法的改进研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(10):90-95.
- [3] 吴君,邹有明,江均. 井下高压电网选择性联锁自适应过流保护系统研究[J]. 工矿自动化,2006(1):14-15.
- [4] 田书,张胜朝. 矿井高压电网的自适应过流保护研究[J]. 电网技术,2008,32(6):27-30.
- [5] 邓超平,唐志军,张曦,等. 一种新型的微网自适应过流保护方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(4):38-43.
- [6] 李银红,段献忠. 电力系统线路保护整定计算一体化系统[J]. 电力系统自动化,2003,27(9):66-69.
- [7] 王磊,孙鸣,单永梅. 高压电网继电保护整定计算软件核心算法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(5):73-76.
- [8] 韩学军,朱涛,韩学山. 供电网继电保护可视化整定计算与动作仿真系统[J]. 电网技术,2004,28(14):28-31.
- [9] 朱永利,宋少群,朱国强,等. 地区电网保护定值在线校验智能系统[J]. 电力系统自动化,2005,29(6):87-92.
- [10] 王福忠,杨茜惠,王新良. 井下高压电网保护定值仿真校验系统[J]. 电子测量技术,2015,38(12):6-11.

作者简介

靳翔(通讯作者),河南理工大学硕士研究生,主要研究方向为矿山信息化。

E-mail:1512961890@qq.com

是德科技 5G 测试解决方案即将亮相 NGMN 2016 年行业会议及展览会

新闻要点:

- 是德科技将展示 EU 5G TRIANGLE 端到端测试床、实时波束赋形和 Anite 虚拟路测工具套件(VDT)
- 作为 NGMN 5G 试验和测试创始小组的积极贡献者,是德科技将参加“5G 试验和测试活动”技术组讨论

2016 年 10 月 12 日,北京——是德科技公司(NYSE: KEYS)日前宣布将在 NGMN 行业会议及展览会上展示其前沿的 5G 测试解决方案。此次会议将于 10 月 12-13 日在德国法兰克福施泰根贝格尔机场酒店举行。

是德科技是下一代移动网络(NGMN)联盟(www.ngmn.org)的成员,也是 NGMN 5G 试验和测试创始(5GTTI)小组活动的主要贡献者。在此次会议上,是德科技的运营商行业解决方案高级总监 Garrett Lees 将参加“5G 试验和测试活动”技术组讨论。

是德科技的技术专家将在展区演示前沿的解决方案。具体展示包括:

EU 5G TRIANGLE 端到端测试床——作为 H2020 EU TRIANGLE 项目的主席(www.triangle-project.eu),是德科技将展示端到端测试实验室的概念,并介绍从移动应用和设备到 EPC 和网络服务的新整体分析方法,以及适用于新应用和设备基准测试的新 KPI。此测试台以 Keysight E7515A UXM 无线测试仪和 N6705B 功率分析仪为中心设计。其中,Keysight E7515A UXM 无线测试仪

能够提供无线接入,并能灵活创造 RAN 操作条件。

实时波束赋形——该演示将使用同步多信道激励响应系统,以 M8195A 任意波形发生器(AWG)作为激励,M9703B 高速数字化仪/宽带数字接收机作为相干接收机,展示在 M9703B FPGA 内部运行的实时波束加权和解调测量,其测量算法使用 Keysight SystemVue 软件平台开发。

虚拟路测——是德科技的 Anite 虚拟路测工具套件使用网络信令和在现场捕获的射频传播日志数据来重现实验室中的真实移动设备性能测试环境。该解决方案使移动运营商在部署之前,能够快速并经济高效地对移动设备和网络基础设施进行基准测试,确定和解决在现场发现的问题。该工具套件使用 Propsim F32 信道仿真器来创建业内最真实的射频条件,实现了实验室与现场测试的无缝对接。

是德科技还提供了许多前沿的 5G 解决方案。在十月举行的 EuMW 周上,是德科技介绍了在毫米波频谱和信号分析中所实现的行业领先的突破性进展。Keysight N9041B UXA X 系列信号分析仪是首款频率范围高达 110 GHz、最大分析带宽高达 5 GHz 的分析仪——覆盖所有当前和未来的 5G 接入和回程毫米波场景以及其他应用,例如 802.11ad/ay 和车载雷达。