

# 基于图论的智能变电站站域后备保护跳闸策略

蒋红亮 吕飞鹏

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

**摘要** 目前对站域后备保护算法研究已有一定的进展, 但对相应跳闸策略研究还比较缺乏。针对这一空白, 本文提出了一种基于图论知识的站域后备保护跳闸策略。根据智能变电站拓扑结构、站间连接关系及断路器状态信息, 形成实时站内元件-开关关联矩阵和站间元件-开关关联矩阵, 然后结合故障元件和失灵断路器的具体情况建立站域元件-开关关联向量, 并通过关联向量识别出站域后备保护在实现近后备保护功能和断路器失灵保护功能时所关联的断路器。算例分析表明, 所提方法可适用于主接线形式复杂和运行方式变化的智能变电站, 能实现自适应最小范围快速切除故障。

**关键词:** 智能变电站; 继电保护; 站域后备保护; 图论; 跳闸策略

## Tripping Strategy for Substation-area Backup Protection in Smart Substation based on Graph Theory

Jiang Hongliang Lv Feipeng

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065)

**Abstract** At present, there is a certain progress in the research of substation-area back up protection algorithm, but it lacks research on corresponding tripping strategy. This paper proposes a tripping strategy for substation-area back up protection based on graph theory. According to the topology structure of smart substation, the inter-substation connection relation and the breaker status information, the real-time substation component-switch correlation matrix and the inter-substation component-switch correlation matrix are formed, and then the substation component-switch relevance vector is established combined with the specific situation of the faulty component and the failure breaker. The breakers that need to be tripped in local backup protection, breaker failure protection can be accurately recognized by the relevance vector. The example analysis shows that the proposed method can be applied to the smart substation with complex main connections and changing operation modes, and can cut off the fault quickly with the minimum blackout zone.

**Keywords:** smart substation; relay protection; substation-area backup protection; graph theory; tripping strategy

传统继电保护通常按间隔分布式配置, 仅能利用有限的本地信息, 使得其后备保护性能的改善受到制约。而智能变电站具有站内信息高度共享的优势, 综合利用站内多间隔电气量信息以及相邻变电站信息来判断故障的站域后备保护可有效地提高后备保护性能<sup>[1-3]</sup>。

目前, 对于站域后备保护的研究已有一定进展,

其中重点研究集中在站域后备保护算法<sup>[4-7]</sup>方面, 即侧重于故障元件的识别, 而对判别故障元件后的跳闸策略却讨论较少。文献[8]提出了满足站域后备保护要求的跳闸方式, 但没有给出具体情况跳闸断路器序列搜索方法。

由于故障元件不同, 站域后备保护在实现近后备保护和断路器失灵保护时所关联的断路器也不

同，而且智能变电站的主接线形式复杂，站内运行方式也会发生变化，如何准确识别出适应当前运行方式的最小范围隔离故障的跳闸序列值得深入研究。本文借鉴广域后备保护跳闸策略研究思路<sup>[9-10]</sup>，在站域电流差动后备保护算法<sup>[11]</sup>已经识别出故障元件的基础上，提出一种自适应最小范围隔离故障的站域后备保护跳闸策略。所提基于图论的跳闸算法能够准确识别出站域后备保护在实现近后备保护功能和断路器失灵保护功能时所需跳开的断路器。由于不存在与其他后备保护时限配合问题，所以可实现最小范围快速隔离故障。

1 站域后备保护系统结构

目前智能变电站采用三层两网结构，“三层”即过程层、间隔层和站控层，“两网”即采用面向通用对象的变电站事件 GOOSE (generic object oriented substation event) 报文通信和 SV (sampled value) 报文通信的过程层与间隔层之间的过程层网络和采用 MMS (manufacture message specification) 报文通信的间隔层与站控层之间的站控层网络，实现了信息采样数字化、通信平台网络化和信息共享标准化，为提高和改善后备保护性能提供了良好条件<sup>[12]</sup>。站域后备保护装置配置于智能变电站间隔层，通过过程层 SV 网获取全站电气量采样值，通过过程层 GOOSE 网获取全站断路器状态信息以及向由站域后备保护跳闸策略确定的相应断路器发送跳闸信息，通过站控层 MMS 网与站控层进行信息交互。此外，还需通过数据通道获取相邻变电站的部分信息。根据各层设备对时间同步精度的要求，站控层设备采用 NTP 网络对时方式，间隔层和过程层设备采用 IRIG-B 对时方式。为了提高保护系统的可靠性和稳定性，站域后备保护装置应采用双重化配置方式，两套互为备用工作，其系统结构如图 1 所示。

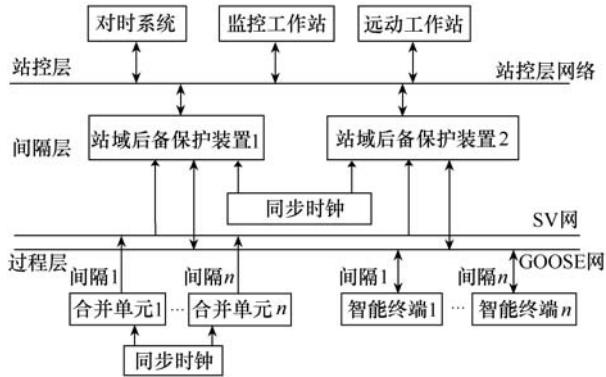


图 1 站域后备保护系统结构图

## 2 基于图论的跳闸策略算法

## 2.1 图论知识概要

图论作为分析复杂工程的有力工具已在电力系统等领域获得广泛应用<sup>[13-14]</sup>。图  $G=(V, E)$  是一个二元组  $(V, E)$  使得  $E \subseteq [V]^2$ ,  $E$  的元素是  $V$  的 2 元子集。集合  $V$  的元素称为图  $G$  的顶点, 集合  $E$  的元素称为图的边, 图即由顶点集合和边集合组成的结构。图的阶由它的节点个数表示, 根据阶的不同, 可分 3 种有限图, 无限图和可数图。电网节点有限, 属于有限图范畴, 将电网中母线、变压器和线路抽象为图的节点, 断路器和隔离开关抽象为图的边, 即可用图论的知识很好地描述电网的拓扑结构。

## 2.2 基于图论的实时元件-开关关联矩阵

由图论的知识可知，智能变电站的主接线形式可抽象成拓扑图  $G=(V, E)$ ，其中集合  $V$  的元素称为图  $G$  的顶点，代表智能变电站中最小保护单元，如母线、变压器和线路；集合  $E$  的元素称为图的边，代表断路器和隔离开关，反映顶点之间的拓扑连接关系。

因此，智能变电站的拓扑结构可由元件-开关关联矩阵  $D$  来表示，元素  $D_{ij}$  为

$$D_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{元件 } i \text{ 与开关 } j \text{ 直接相连} \\ 0 & \text{元件 } i \text{ 与开关 } j \text{ 非直接相连} \end{cases} \quad (1)$$

以图 4 所示典型 500kV 智能变电站 I 及其相邻电网为例，智能变电站 I 的站域保护范围如图 4 虚线所示，站内断路器为虚线范围内的断路器。分别用 B、T、L 和 DL 来表示母线、变压器、线路和断路器，则反映智能变电站 I 拓扑连接关系的站内元件-开关关联矩阵  $D_{\text{sub}}$  为

式中，矩阵的阶数为  $18 \times 20$ ，行分别对应站内保护元件依次为母线  $B_1—B_8$ ，变压器  $T_1、T_2$ ，出线  $L_1—L_8$ ；列分别对应断路器  $DL_1—DL_{20}$ 。该矩阵反映站内元件与断路器的连接关系，取决于该站的一次主接线形式。

站域后备保护装置根据其  $t$  时刻收到的各间隔 GOOSE 报文信息，形成  $t$  时刻站内断路器状态向量  $I$  为

$$I = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (3)$$

向量  $I$  中，从左到右依次对应为断路器  $DL_1—DL_{20}$ ，1 表示该断路器处于闭合状态；0 表示该断路器处于断开状态。

将断路器状态向量  $I$  表示为对角矩阵形式，则有  $I_D = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$ ，则智能变电站 I 的实时站内元件-开关关联矩阵  $D_{\text{sub}(t)}$  为

$$D_{\text{sub}(t)} = D_{\text{sub}} I_D \quad (4)$$

在  $D_{\text{sub}(t)}$  中，1 表示该站内元件与对应的断路器有电气联系，0 表示该站内元件与对应的断路器无电气联系。

在图 4 所示的系统中，以智能变电站 I 为中心的站间元件-开关关联矩阵  $D_{\text{net}}$  为

$$D_{\text{net}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中，矩阵的阶数为  $12 \times 19$ ，行分别对应变电站 I、II、III、IV 和线路  $L_1—L_8$ ；列分别对应断路器  $DL_1、DL_3、DL_4、DL_6、DL_{15}—DL_{29}$ 。该矩阵反映智能变电站 I 与其他变电站拓扑连接关系。

### 2.3 站域后备保护跳闸策略算法

站域后备保护的功能要求是与主保护动作相配合，在主保护拒动或断路器失灵时，能实现快速最小范围隔离故障。以图 4 所示系统为例，当智能变电站 I 出线  $L_8$  故障时，近后备保护需要跳开出线  $L_8$  本侧断路器  $DL_{20}$ ，对侧断路器  $DL_{26}$  的跳闸命令由相邻变电站对应的保护负责提供；当母线  $B_4$  故障时，近后备保护需要跳开的断路器为与其有电气联系的断路器  $DL_{10}、DL_{12}、DL_{17}、DL_{18}、DL_{19}$  和  $DL_{20}$ ；当出线  $L_8$  故障且断路器  $DL_{20}$  失灵时，则需跳开与  $L_8$  背侧母线有电气联系的断路器  $DL_{10}、DL_{12}、DL_{17}、DL_{18}$  和  $DL_{19}$ ；若母线  $B_4$  故障线路本侧断路器  $DL_{20}$  失灵时，断路器失灵保护需要跳开智能变电站 I 出线  $L_8$  对侧断路器  $DL_{26}$ ，由于断路器  $DL_{26}$  时属于相邻变电站 IV 站域保护范围，则需利用以智能变电站 I 为中心的站间关联矩阵  $D_{\text{net}}$  搜索出需跳开的断路器，通过电网调度中心转发跳闸命令。由前面分析可知，元件近后备保护需要跳开故障元件相连的站内断路器，而断路器失灵保护需要跳开该失灵断路器相连非故障元件近后备保护关联的非失灵断路器。因此，需要实现的保护功能不一样，故障元件和断路器失灵具体情况不一样，需要构建不一样的跳闸策略。

#### 1) 站域近后备保护跳闸策略

在站域保护范围内发生故障时，站域后备保护装置根据保护原理得到故障元件位置，构造故障元件列向量  $F_i$ ， $F_i$  中的元素为站域保护范围内的保护元件，包括母线、变压器和出线，排列顺序跟站内元件-开关关联矩阵  $D_{\text{sub}}$  中一样，其元素  $F_i$  定义如下：

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{元件 } i \text{ 故障} \\ 0 & \text{元件 } i \text{ 未故障} \end{cases} \quad (6)$$

定义近后备站域元件-开关关联向量  $M_c$  如下：

$$M_c = D_{\text{sub}(t)}^T F_i \quad (7)$$

式中，所得列向量  $M_c$  元素由 0 和 1 组成，1 元素表示故障元件与对应的断路器有电气联系；0 元素表示故障元件与对应的断路器无电气联系。

因此，近后备保护跳闸序列向量即为  $M_c$ ，其中当  $M_{ci}=1$  时对应的断路器  $DL_i$  即为近后备保护关联的断路器。

站域近后备保护与元件主保护相配合，检测主

保护拒动时，启动近后备保护跳闸策略向其关联断路器发出跳闸命令。近后备保护跳闸策略流程如图2所示。

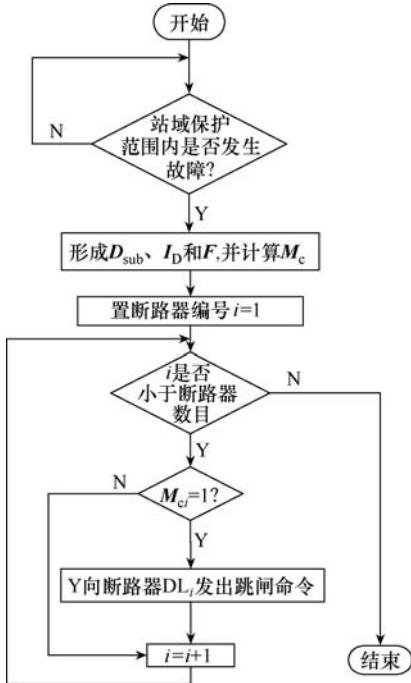


图2 近后备保护跳闸策略流程图

## 2) 站域断路器失灵跳闸策略

断路器失灵保护跳闸涉及两种情况：①断路器失灵保护需要跳开的断路器为站内断路器，对应的故障元件和失灵断路器的组合情况为：母线故障时母联/分段断路器失灵、母线故障时变压器侧断路器失灵、变压器故障时其某侧断路器失灵和线路故障时线路本侧断路器失灵；②断路器失灵保护需要跳开的断路器为相邻站断路器，对应的故障元件和失灵断路器的组合情况为母线故障时线路侧断路器失灵。因此，按以上两种情况对断路器失灵跳闸策略进行分析。

在站域保护范围内发生故障后，站域后备保护装置根据2.3中1)节的算法得到近后备保护需要跳开的断路器，并向相应的断路器发送跳闸信息，同时监视反映断路器状态信息相应的GOOSE报文，若解析对应GOOSE报文显示需要跳开的断路器仍处于闭合状态，则判定该断路器失灵。然后启动断路器失灵跳闸策略，动作延时超过断路器失灵保护动作整定时间后向其关联的断路器发出跳闸命令。

### (1) 断路器失灵保护关联断路器为站内断路器情况的跳闸策略

站域后备保护装置根据断路器失灵信息形成断

路器失灵列向量  $\mathbf{G}_1$ ,  $\mathbf{G}_1$  中的元素为站域后备保护范围内的断路器，排列顺序跟站内元件-开关关联矩阵  $\mathbf{D}_{\text{sub}}$  中的断路器一样，其元素  $G_i$  定义如下：

$$G_i = \begin{cases} 1 & \text{断路器 } i \text{ 失灵} \\ 0 & \text{断路器 } i \text{ 未失灵} \end{cases} \quad (8)$$

定义失灵站域元件-开关关联向量  $\mathbf{T}_c$  如下：

$$\mathbf{T}_c = \mathbf{D}_{\text{sub}(t)}^T \mathbf{D}_{\text{sub}} \mathbf{G}_1 \quad (9)$$

式中，列向量  $\mathbf{D}_{\text{sub}} \mathbf{G}_1$  由 0 和 1 组成，1 表示元件与失灵断路器直接相连，0 表示元件与失灵断路器非直接相连； $\mathbf{T}_c$  为实现该失灵断路器两端相连元件近后备保护跳闸策略得到的近后备站域元件-开关关联向量。

定义运算： $\mathbf{X}=[\mathbf{Y}]$ ，其中  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  均为列向量，元素  $X_i$  为

$$X_i = \begin{cases} 1 & Y_i = 1 \\ 0 & Y_i \neq 1 \end{cases} \quad (10)$$

由于断路器失灵保护需要跳开的断路器为该失灵断路器相连非故障元件近后备保护所关联的非失灵断路器，因此断路器失灵保护跳闸序列向量  $\mathbf{T}$  可以表示为

$$\mathbf{T} = [\mathbf{T}_c] = [\mathbf{D}_{\text{sub}(t)}^T \mathbf{D}_{\text{sub}} \mathbf{G}_1] \quad (11)$$

式中，当  $T_i=1$  时对应的断路器  $DL_i$  即为断路器失灵保护关联的断路器。

### (2) 断路器失灵保护关联断路器为相邻站断路器情况的跳闸策略

站域后备保护装置根据保护原理得到故障元件位置，构造故障元件列向量  $\mathbf{F}_2$ ,  $\mathbf{F}_2$  中的元素为变电站Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和线路 L<sub>1</sub>—L<sub>8</sub>，其元素  $F_i$  定义由式(6)给出；根据断路器失灵信息形成断路器失灵列向量  $\mathbf{G}_2$ ,  $\mathbf{G}_2$  中的元素为站间元件-开关关联矩阵  $\mathbf{D}_{\text{net}}$  里对应的断路器，排列顺序与其一致，其元素  $G_i$  定义由式(9)给出。

则失灵断路器所连非故障元件向量  $\mathbf{N}$  为

$$\mathbf{N} = (\mathbf{D}_{\text{net}} \mathbf{G}_2) \cdot \bar{\mathbf{F}}_2 \quad (12)$$

式中，列向量  $\mathbf{D}_{\text{net}} \mathbf{G}_2$  由 0 和 1 组成，1 表示元件与失灵断路器直接相连，0 表示元件与失灵断路器非直接相连； $\bar{\mathbf{F}}_2$  为故障元件列向量  $\mathbf{F}_2$  取反；两者作点乘运算，所得列向量  $\mathbf{N}$  中的非零元素即为失灵断

路器所连非故障元件。

定义失灵站域元件-开关关联向量  $\mathbf{T}_c$  如下:

$$\mathbf{T}_c = (\mathbf{D}_{\text{net}}^T \mathbf{N}) \cdot \bar{\mathbf{G}}_2 \quad (13)$$

式中,  $\mathbf{D}_{\text{net}}^T \mathbf{N}$  中的非零元素表示失灵断路器所连非故障元件近后备保护需要跳开的断路器;  $\bar{\mathbf{G}}_2$  为断路器失灵列向量  $\mathbf{G}_2$  取反; 两者作点乘运算, 所得列向量  $\mathbf{T}_c$  中的非零元素即为失灵断路器所连非故障元件近后备保护所关联的非失灵断路器。

因此, 断路器失灵保护跳闸序列向量  $\mathbf{T} = \mathbf{T}_c$ , 其中当  $T_i=1$  时对应的断路器  $DL_i$  即为断路器失灵保护关联的断路器。断路器失灵跳闸策略流程图如图 3 所示。

### 3 算例分析

以如图 4 所示电网进行分析, 该系统包括智能变电站 I 的全部拓扑结构(其主接线形式比较复杂, 包括 3/2 接线、双母双分段接线和单母线接线)以及与其直接相连的变电站 II、III、IV 的部分拓扑结构, 其中站 II 含 3/2 接线, 站 III 含双母线接线, 站 IV 含双母线接线单分段接线。在智能变电站 I 站域后备保护中, 保护元件为母线  $B_1$ — $B_8$ , 变压器  $T_1$  和  $T_2$  以及出线  $L_1$ — $L_8$ ; 站内断路器为  $DL_1$ — $DL_{20}$ 。以智能变电站 I 的站域后备保护跳闸策略为例进行分析, 以验证本文方法的可行性和有效性。

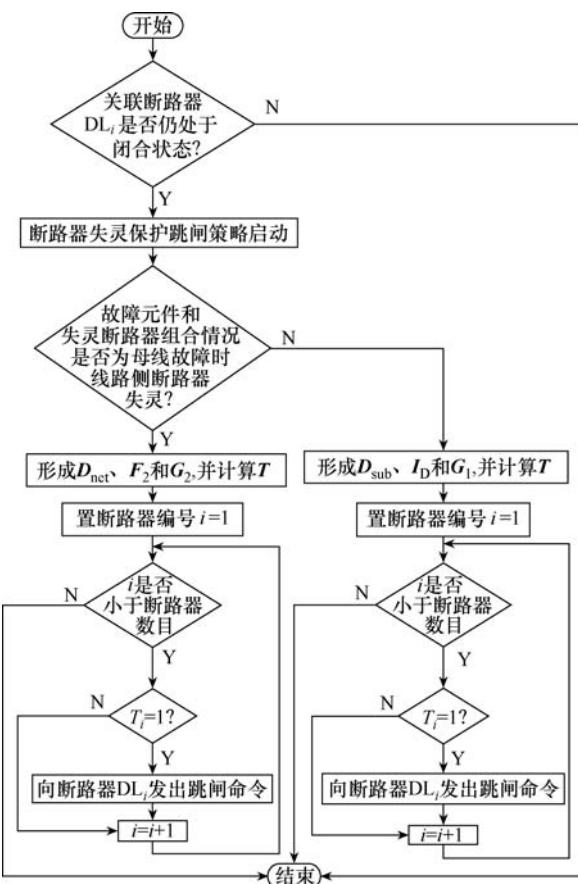


图 3 断路器失灵跳闸策略流程图

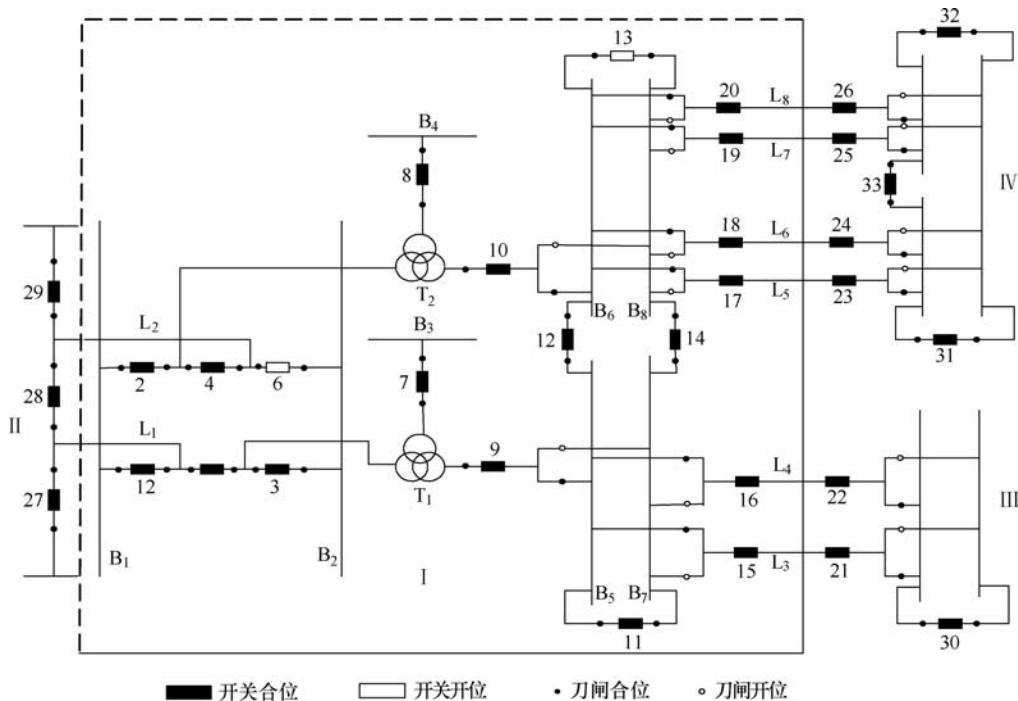


图 4 电网详细接线图

在故障发生前, 站域后备保护装置要对本站站内拓扑结构以及本站与相邻站的连接关系进行实时搜索, 形成站内站内元件-开关关联矩阵  $D_{\text{sub}}$  和站间元件-开关关联矩阵  $D_{\text{net}}$ 。

由式(2)至式(4)可得, 智能变电站I的实时站内元件-开关关联矩阵  $D_{\text{sub}(t)}$  为

$$D_{\text{sub}(t)} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

### 3.1 元件近后备保护跳闸策略

如果智能变电站I出线L<sub>8</sub>故障, 站域后备保护装置根据保护原理得到的故障元件列向量  $F_1=(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T$ , 通过对反映断路器状态的GOOSE报文解析形成故障时刻t时的断路器状态向量  $I=(1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T$ , 构建断路器状态对角矩阵  $I_D$ , 将数据代入式(4)和(7)中, 可得  $M_c=(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T$ , 站域后备保护装置向断路器DL<sub>20</sub>发出跳闸命令。

同样, 若智能变电站I母线B<sub>6</sub>故障, 站域后备保护装置根据保护原理得到的故障元件列向量  $F_1=(0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$  和断路器状态对角矩阵  $I_D$ , 按照式(4)和(7)计算, 可得  $M_c=(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1)^T$ , 站域后备保护装置向断路器DL<sub>10</sub>、DL<sub>12</sub>、DL<sub>17</sub>、DL<sub>18</sub>、DL<sub>19</sub>和DL<sub>20</sub>发出跳闸命令。

### 3.2 断路器失灵保护跳闸策略

1) 断路器失灵保护需要跳开的断路器为站内断路器的情况

如果智能变电站I出线L<sub>8</sub>故障同时线路本侧断路器DL<sub>20</sub>失灵时, 站域后备保护装置根据断路器失灵信息得到的断路器失灵列向量  $G_1=(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T$ , 通过对反映断路器状态的GOOSE报文解析形成故障时刻t时的断路器状态向量  $I=(1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T$ , 构建断路器状态对角矩阵  $I_D$ , 将数据依次代入式(4)、(9)、(10)和(11), 可得  $T=(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0)^T$ , 站域后备保护装置向断路器DL<sub>10</sub>、DL<sub>12</sub>、DL<sub>17</sub>、DL<sub>18</sub>和DL<sub>19</sub>发出跳闸命令。

2) 断路器失灵保护需要跳开的断路器为相邻站断路器的情况

若智能变电站I母线B<sub>6</sub>故障同时线路L<sub>8</sub>本侧断路器DL<sub>20</sub>失灵时, 站域后备保护装置根据保护原理得到的故障元件列向量  $F_2=(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ , 根据断路器失灵信息得到的断路器失灵列向量  $G_2=(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ , 站间元件-开关关联矩阵  $D_{\text{net}}$  如式(5)所示, 将数据依次代入式(12)和式(13), 可得  $T=(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0)^T$ , 即需要跳开的断路器为线路L<sub>8</sub>对侧断路器DL<sub>26</sub>, 站域后备保护装置上传跳闸信息并由电网调度中心向变电站IV转发跳闸命令。

## 4 结论

为了改善智能变电站后备保护性能, 智能变电站站域后备保护系统研究备受关注, 本文着重研究了基于图论的站域后备保护跳闸策略。所提算法不仅能正确识别出站域后备保护实现近后备保护和断路器失灵保护功能时所关联的断路器, 而且能在最小范围内快速隔离故障, 同时对智能变电站复杂的主接线形式和变化的运行方式具有较好的适应性。

## 参考文献

- [1] 宋璇坤, 李颖超, 李军, 等. 新一代智能变电站层次化保护系统[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 24-29.
- [2] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 智能变电站站域保护研究综述[J]. 华东电力, 2013, 41(5): 947-953.
- [3] 朱俐颖, 高亮. 基于站域保护原理的智能变电站总

(下转第37页)