

基于开关路径函数集的新型厂站内网络拓扑方法

王增平, 张晋芳, 张亚刚

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

A Novel Substation Configuration Identification Algorithm Based on the Set of Breaker-path Functions

WANG Zengping, ZHANG Jinfang, ZHANG Yagang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The traditional adjacent matrix method applied in the substation configuration identification has many online procedure steps, which is time consuming and bad performance for real-time applications. In the stage of original topology analysis, the complete connection matrix is gained by use of a lot of logical operations based on the original adjacent matrix formed in online; in the tracking procedure, the original matrix needs to be modified in online, and the connectivity has to be determined by the repeatedly use of the original analysis methods. After the formation of the original adjacent matrix as a function of the breaker status, the breaker-path functions of the elements in the complete connection matrix were formed based on the adjacent matrix inversion and symbol operations. Having introduced the simple principles based on the generation addition and multiplication into the simplification of the breaker-path functions, the novel substation configuration identification method based on the set of breaker-path functions was established. Finally, the simulation examples validated that the novel method was able to reduce the online time consumed remarkably and enhance the real-time and speediness, whose main procedures contained the offline formation of the breaker function set and the online solution to the above functions by substituting of real-time breaker status.

KEY WORDS: substation configuration; original adjacent matrix; complete connection matrix; breaker-path functions; tracking the status change of breakers; general multiplication and addition operations

摘要: 应用于厂站内拓扑分析的传统邻接矩阵方法在线处理过程多,耗时长,实时性低,主要表现为:初始拓扑分析时,需要在线形成初始邻接矩阵,并进行大量逻辑运算获

得全连通矩阵;跟踪开关变位时,需要在线修改初始邻接矩阵,并重复利用各种处理方法判断连通性。在获得开关变量形式的邻接矩阵基础上,利用符号运算,结合伴随阵求逆,形成全连通矩阵中各元素对应的开关变量函数,并应用基于广义加、乘运算建立的简化原则加以处理得到最简形式,进而提出基于最简开关路径函数集合的厂站内拓扑分析新算法。通过仿真计算证明,新算法所采用的离线形成开关路径函数集合,在线带入实时开关状态求解的处理过程,大幅缩减了在线处理耗时,有效地提高了拓扑分析的快速性和实时性。

关键词: 厂站内拓扑; 初始邻接矩阵; 全连通矩阵; 开关路径函数; 开关变位跟踪; 广义加、乘运算

0 引言

电力系统网络拓扑分析是现代电力系统能量控制管理内容的核心内容,是包括状态估计、潮流计算、稳定计算、继电保护整定等在内的众多电力系统分析功能实现的基础^[1]。由厂站层并行分布完成各发电厂变电站内母线分析,然后将分析结果上交给控制中心层完成厂站间系统网络拓扑的分层分布式网络拓扑分析模式是高度适应于未来智能电网智能控制中心(smart control center, SCC)发展要求的新型拓扑分析模式^[2-4]。现有的网络拓扑分析方法主要包括树状搜索法和邻接矩阵法两大类,通常不加区分地同时应用在厂站内和控制中心层两层拓扑分析中。在分层分布式模式下,厂站层和控制中心层所采用的拓扑分析方法允许不同,文献[5]中提出了一种矩阵法用于厂站层拓扑而搜索法用于控制中心层拓扑的思路。网络拓扑分析的时间消耗绝大部分被厂站内拓扑分析所占用^[6],因此在各个发电厂变电站并行分析提高拓扑效率的基础上,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50837002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50837002).

如何从初始邻接矩阵 A_{org} 得到全连通矩阵 A_{adj} 便是矩阵法解决连通性问题的根本出发点。

节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵是电力系统应用广泛的节点矩阵，对于存在接地支路的网络，节点导纳矩阵与节点阻抗矩阵互为逆阵^[16-17]。

从节点导纳矩阵的形成规则可以得到：表征节点间一阶连通性的初始邻接矩阵与同一图对应的节点导纳矩阵有着完全一样的零元素和非零元素分布。而表征节点间全局连通性的全连通矩阵与该图对应的节点阻抗矩阵有着完全一样的零元素和非零元素分布。

全连通矩阵的特点是表达了任意两个节点是否连通。若考虑节点阻抗矩阵的物理意义，即节点阻抗矩阵的第 i 行对角元素，在数值上等于在该节点注入单位电流时，其他节点注入电流均为零时，节点 i 的电压；第 i 行非对角元素，在数值上等于由节点 i 注入单位电流时，其他节点注入电流为零时，其他节点上的电压，由于网络中各个节点之间总是存在着直接或间接的电磁联系，所以所有节点的对地电压一般都不为零^[16-17]。也就是说同一连通片上的节点必定有电压值，而不同连通片上则没有电压。利用电压值的分布与有无可以表征任意两个节点间的连通性。节点阻抗矩阵可从全局角度来刻画节点之间的连通性，与全连通矩阵的特点是完全一致的^[18]。因此，节点矩阵与邻接矩阵之间是拓扑对等的，类似地，可将节点导纳矩阵与节点阻抗矩阵之间的互逆关系等效映射到初始邻接矩阵与全连通矩阵之间来，借鉴获得从初始邻接矩阵到全连通矩阵的方法。

2 基于余子式的路径函数集形成方法及简化原则

2.1 余子式方法的引入

如果将点边图中的边作为有开、合两种状态的布尔变量，那么邻接矩阵可以看成是以图中所有边为自变量的函数矩阵^[19]，即某时刻边的状态组合决定了当前条件下图中节点的连通片划分。函数矩阵形式的邻接矩阵包含了所对应图的固有网架结构，并能把边状态的变化加以灵活表征。

节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵存在互逆的关系，考虑到线性代数中利用伴随矩阵以及行列式求取逆阵的基本方法，本文首先将初始邻接矩阵表达成开关状态的函数矩阵，即

$$A_{\text{org}} = M(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & e_1 & e_2 & e_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & e_7 & e_8 & e_9 & 0 \\ e_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & e_4 & 0 & 0 & 0 \\ e_2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & e_5 & 0 & 0 \\ e_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & e_6 \\ 0 & e_7 & e_4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_8 & 0 & e_5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & e_9 & 0 & 0 & e_6 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

进一步，由前文说明节点矩阵与邻接矩阵之间的拓扑对等性，则函数矩阵形式的全连通矩阵可以由式(1)进行求逆，即

$$A_{\text{org}}(i, j) = A_{\text{org}}^*(j, i) / |A_{\text{org}}| \quad (2)$$

式中 $A_{\text{org}}^*(j, i)$ 为元素 $A_{\text{org}}(j, i)$ 的代数余子式。利用上述方法可得到图 1 中任意两个节点间连通性的函数表达式，如节点 v_1 、 v_2 间的函数表达式为

$$A_{\text{adj}}(1, 2) = (-e_1 e_4 e_7 + e_1 e_4 e_7 e_5^2 + e_1 e_4 e_7 e_6^2 - e_1 e_4 e_7 e_5^2 e_6^2 - e_2 e_5 e_8 + e_2 e_5 e_8 e_4^2 + e_2 e_5 e_8 e_6^2 - e_2 e_5 e_8 e_4^2 e_6^2 - e_3 e_6 e_9 + e_3 e_6 e_9 e_4^2 + e_3 e_6 e_9 e_5^2 - e_3 e_6 e_9 e_4^2 e_5^2) / \Delta \quad (3)$$

式中 Δ 为 A_{org} 的行列式，即 $\Delta = |A_{\text{org}}|$ ，则

$$\begin{aligned} \Delta = & 1 - e_1^2 - e_2^2 - e_3^2 - e_4^2 + e_2^2 e_4^2 + e_3^2 e_4^2 - e_5^2 + e_1^2 e_5^2 + \\ & e_3^2 e_5^2 + e_4^2 e_5^2 - e_3^2 e_4^2 e_5^2 - e_6^2 + e_1^2 e_6^2 + e_2^2 e_6^2 + e_4^2 e_6^2 - \\ & e_2^2 e_4^2 e_6^2 + e_5^2 e_6^2 - e_1^2 e_5^2 e_6^2 - e_4^2 e_5^2 e_6^2 - e_7^2 + e_1^2 e_7^2 + \\ & e_2^2 e_7^2 + e_3^2 e_7^2 + e_5^2 e_7^2 - e_1^2 e_5^2 e_7^2 - e_3^2 e_5^2 e_7^2 + e_6^2 e_7^2 - \\ & e_1^2 e_6^2 e_7^2 - e_2^2 e_6^2 e_7^2 - e_5^2 e_6^2 e_7^2 + e_1^2 e_5^2 e_6^2 e_7^2 - 2e_1 e_2 e_4 e_5 e_7 e_8 + \\ & 2e_1 e_2 e_4 e_5 e_6^2 e_7 e_8 - e_8^2 + e_1^2 e_8^2 + e_2^2 e_8^2 + e_3^2 e_8^2 + e_4^2 e_8^2 - \\ & e_2^2 e_4^2 e_8^2 - e_3^2 e_4^2 e_8^2 + e_6^2 e_8^2 - e_1^2 e_6^2 e_8^2 - e_2^2 e_6^2 e_8^2 - e_4^2 e_6^2 e_8^2 + \\ & e_2^2 e_4^2 e_6^2 e_8^2 - 2e_1 e_3 e_4 e_6 e_7 e_9 + 2e_1 e_3 e_4 e_5^2 e_6 e_7 e_9 - \\ & 2e_2 e_3 e_5 e_6 e_8 e_9 + 2e_2 e_3 e_4^2 e_5 e_6 e_8 e_9 - e_9^2 + e_1^2 e_9^2 + \\ & e_2^2 e_9^2 + e_3^2 e_9^2 + e_4^2 e_9^2 - e_2^2 e_4^2 e_9^2 - e_3^2 e_4^2 e_9^2 + e_5^2 e_9^2 - \\ & e_1^2 e_5^2 e_9^2 - e_3^2 e_5^2 e_9^2 - e_4^2 e_5^2 e_9^2 + e_3^2 e_4^2 e_5^2 e_9^2 \end{aligned}$$

类似地，全连通矩阵中的每一个元素都可以表达为边集的布尔函数。这样，在函数表达式确定的条件下，实际的边的状态就可以作为已知量代入，从而直接由求出的函数值来形成对应的全连通矩阵。上述由各元素函数表达式确定全连通矩阵的过程，是若干个函数表达式一步到位的求值过程，从理论上有效地避免了传统的由具体边集状态确定初始邻接矩阵，再由初始邻接矩阵通过各种算法求取全连通矩阵的过程。针对特定的图，这些函数表达式是固定的，可以首先形成。在实际判断连通性时，将对应的边状态作为已知量代入上述一系列函数表达式进行求值，并根据函数值确定连通情况，

从而节省了在线判断的时间,这也为电力系统网络拓扑方法的改进奠定了理论基础。

2.2 函数表达式的简化原则

从示例 $A_{adjs}(1,2)$ 可以看出,由2.1节中方法求得的函数表达式是极其繁琐和复杂的,不利于实际应用。但是,通过深入挖掘函数表达式中各项的特点以及相互之间的关系,本文建立了极为有效的简化原则,能够得到清晰刻画节点间连通路径的最简函数表达式。简化原则如下。

1) 全连通矩阵是对称阵,而且对角线元素确定为1,因此对于 n 节点图,需要考虑的元素为该阵的上三角阵者下三角阵,从而元素函数表达式的个数为 $0.5n(n-1)$,接近总元素个数的50%。

2) 函数表达式中包括“+”,“-”,“ \times ”、乘方等运算,而自变量是只有“0”,“1”两种取值的布尔变量,借鉴文献[10-12]对高斯消元过程的处理,引入广义布尔加“ \oplus ”、广义布尔乘“ \otimes ”运算进行简化。用广义运算取代表达式中的代数运算,具体是用广义布尔加“ \oplus ”代替“+”、“-”运算,用广义布尔乘“ \otimes ”代替代数运算“ \times ”以及乘方。同时,传统布尔逻辑中的定律仍然适用于广义布尔运算。

在定义了广义运算并明晰该运算与代数运算关系的基础上,可得行列式 $S(\Delta)=S(A_{org})=1$ 恒成立,则在分母位置上的 Δ 不会对全连通矩阵中各元素由余子式确定的布尔值产生影响,因此消去分母有

$$A_{adjs}(i,j) = S(A_{adj}(i,j)) = S(A_{org}^*(j,i) / |A_{org}|) = S(A_{org}^*(j,i)) = A_{orgs}^*(j,i) \quad (4)$$

式中: $S(*)$ 为简化处理操作; A_{adjs} 为最简函数表达式形成的全连通函数矩阵。应用上述原则对式(3)进行化简,过程如下:

$$A_{adjs}(1,2) = S(A_{adjs}(1,2)) = S((-e_1e_4e_7 + e_1e_4e_7e_5^2 + e_1e_4e_7e_6^2 - e_1e_4e_7e_5^2e_6^2 - e_2e_5e_8 + e_2e_5e_8e_4^2 + e_2e_5e_8e_6^2 - e_2e_5e_8e_4^2e_6^2 - e_3e_6e_9 + e_3e_6e_9e_4^2 + e_3e_6e_9e_5^2 - e_3e_6e_9e_4^2e_5^2) / \Delta) = \oplus(e_1 \otimes e_4 \otimes e_7) \oplus (e_1 \otimes e_4 \otimes e_7 \otimes (e_5 \otimes e_5)) \oplus (e_1 \otimes e_4 \otimes e_7 \otimes (e_6 \otimes e_6)) \oplus (e_1 \otimes e_4 \otimes e_7 \otimes (e_5 \otimes e_5 \otimes e_6 \otimes e_6)) \oplus (e_2 \otimes e_5 \otimes e_8) \oplus (e_2 \otimes e_5 \otimes e_8 \otimes (e_4 \otimes e_4)) \oplus (e_2 \otimes e_5 \otimes e_8 \otimes (e_6 \otimes e_6)) \oplus (e_2 \otimes e_5 \otimes e_8 \otimes (e_4 \otimes e_4 \otimes e_6 \otimes e_6)) \oplus (e_3 \otimes e_6 \otimes e_9) \oplus (e_3 \otimes e_6 \otimes e_9 \otimes (e_4 \otimes e_4)) \oplus (e_3 \otimes e_6 \otimes e_9 \otimes (e_5 \otimes e_5)) \oplus (e_3 \otimes e_6 \otimes e_9 \otimes (e_4 \otimes e_4 \otimes e_5 \otimes e_5)) = (e_1 \otimes e_4 \otimes e_7 \otimes (1 \oplus e_5 \oplus e_6 \oplus (e_5 \otimes e_6))) \oplus (e_2 \otimes e_5 \otimes e_8 \otimes (1 \oplus e_4 \oplus e_6 \oplus (e_4 \otimes e_6))) \oplus (e_3 \otimes e_6 \otimes e_9 \otimes (1 \oplus e_4 \oplus e_5 \oplus (e_4 \otimes e_5))) = (e_1 \otimes e_4 \otimes e_7) \oplus (e_2 \otimes e_5 \otimes e_8) \oplus (e_3 \otimes e_6 \otimes e_9)$$

最终获得的全连通矩阵元素 $A_{adjs}(1,2)$ 表达式非常简洁,而且能清晰地刻画了节点 v_1 和 v_2 之间的有且仅有的3条连通路径。 $A_{adjs}(1,2)$ 表达的路径情况如图2所示。

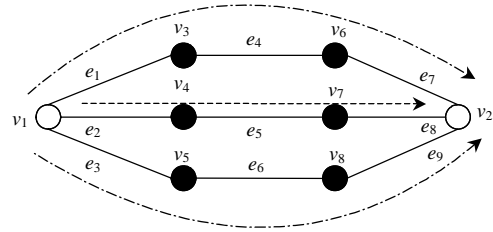


图2 $A_{adjs}(1,2)$ 内嵌节点 v_1, v_2 之间的路径示意图

Fig. 2 Paths between node v_1 and node v_2 embedding in $A_{adjs}(1,2)$

3 基于开关路径函数的厂站内拓扑分析新算法

厂站内网络拓扑分析的本质是电气节点间连通性的判断。根据图论知识,任何一个发电厂变电站主接线图都可以抽象为图论中的图,主接线中的物理母线及电力设备的电气连接点映射为图的节点集,而隔离开关及断路器合成开关并映射为图的边集,边集与节点集之间的联系由实际主接线的具体情况决定。本文以电气主接线中最为复杂的一台半断路器接线形式为例进行分析。

一个典型的一台半断路器接线形式如图3所示。

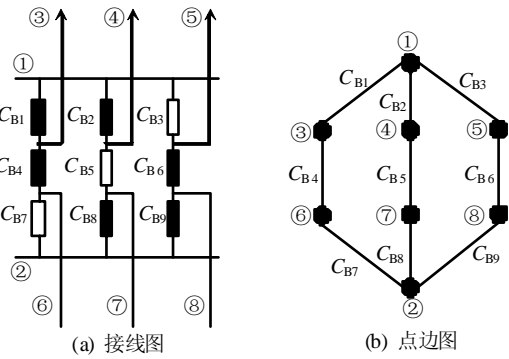


图3 典型的一台半断路器接线形式及其对应点边图

Fig. 3 Typical one and a half breakers connection and the corresponding node-branch diagram

在不考虑开关具体“开”、“合”状态的前提下,图3(a)接线图映射成的图如图3(b)点边图所示。以布尔变量 C_{Bi} 代表第 i 条开关支路的具体状态,则有:当开关处于合位时, $C_{Bi}=1$; 开关处于开位时, $C_{Bi}=0$ 。图3对应的开关状态向量为

$$C_B = [C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, C_{B4}, C_{B5}, C_{B6}, C_{B7}, C_{B8}, C_{B9}]^T$$

对应生成的初始邻接函数矩阵为

$$A_{org} = F(C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, C_{B4}, C_{B5}, C_{B6}, C_{B7}, C_{B8}, C_{B9}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & C_{B1} & C_{B2} & C_{B3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & C_{B7} & C_{B8} & C_{B9} \\ C_{B1} & 0 & 1 & 0 & 0 & C_{B4} & 0 & 0 \\ C_{B2} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & C_{B5} & 0 \\ C_{B3} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & C_{B6} \\ 0 & C_{B7} & C_{B4} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_{B8} & 0 & C_{B5} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & C_{B9} & 0 & 0 & C_{B6} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

按照第 2 节的余子式方法，通过符号计算，并利用 2.2 节化简原则处理后得到对应于图 3 所示主接线的全连通函数矩阵 $A_{adjs}(C_B)$ 。由于边集由真正的开关映射的边组成，因此本文形象地将所得到的函数表达式称为开关路径函数。在 $A_{adjs}(C_B)$ 中，第 i 行、 j 列元素的开关路径函数表达式用 $F(i, j)$ 表示，由矩阵对称特点，只列出上三角阵：

$$A_{adjs_upper}(C_B) = \begin{bmatrix} 1 & F(1,2) & F(1,3) & F(1,4) & F(1,5) & F(1,6) & F(1,7) & F(1,8) \\ & 1 & F(2,3) & F(2,4) & F(2,5) & F(2,6) & F(2,7) & F(2,8) \\ & & 1 & F(3,4) & F(3,5) & F(3,6) & F(3,7) & F(3,8) \\ & & & 1 & F(4,5) & F(4,6) & F(4,7) & F(4,8) \\ & & & & 1 & F(5,6) & F(5,7) & F(5,8) \\ & & & & & 1 & F(6,7) & F(6,8) \\ & & & & & & 1 & F(7,8) \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵中各个元素函数具体表达式见附录 A 中表 A1 所示。根据主接线中各个开关具体的状态取值，通过求取表 A1 中所列出的全连通矩阵各元素的开关路径函数的函数值，就可以直接获得全连通矩阵，进而进行连通性的判断，划分连通片。上述开关路径函数的个数和具体表达式与实际各个发电厂变电站的主接线形式直接相关，对于每一个发电厂或者变电站，都对应着类似一组开关路径函数，也就是映射成与主接线唯一对应的一个开关路径函数集合。因此，依赖于全连通矩阵中各个元素的开关路径函数，本文建立了基于开关路径函数集的新型厂站内网络拓扑分析方法。

新型厂站内拓扑分析方法所需的函数集合完全离线形成，不占用在线的拓扑分析时间。在进行拓扑分析时，只需要将采集到厂站内的开关状

态取值代入函数，经过少量在线逻辑运算就可以获得全连通矩阵，进而判断节点间连通性。直接求取全连通矩阵元素函数值的思路，有利地避免了传统拓扑分析中根据开关状态确定初始邻接矩阵，然后再从初始邻接矩阵在线由传统算法求取全连通矩阵的庞大计算量，并且还将在在线拓扑的时间进行了压缩，从原理上比传统算法更能保证满足拓扑实时性的实现。虽然引入了符号运算进行矩阵相关处理，并且需要利用第 2 节建立的化简原则进行处理以获得最简开关路径函数表达式，但是值得指出的是上述两个过程都可以离线进行，并不占用在线拓扑时间。同时，函数表达式把求解传递闭包元素的过程解析化，利于验证和纠错，更能保证拓扑结果的可靠性。另外，当开关发生变位时，传统算法需要根据更新的开关状态向量修改初始邻接矩阵，然后再利用各种原有算法重新形成全连通矩阵，跟踪上的时间消耗相当于再一次的初始拓扑分析，而新算法除了保持初始拓扑已具有的节省时间的优势外，在跟踪策略上还结合具体的开关变位事件，以进一步提高跟踪的效率。图 4 给出了新型算法与传统算法的拓扑分析流程的对比结果，新算法将繁琐复杂的开关函数表达求取、化简过程放到了离线计算部分，把根据实时开关状态，利用简单函数表达式进行求值过程放到在线处理环节，相比较于传统算法的一并处理模式，新算法的优势更为明显。

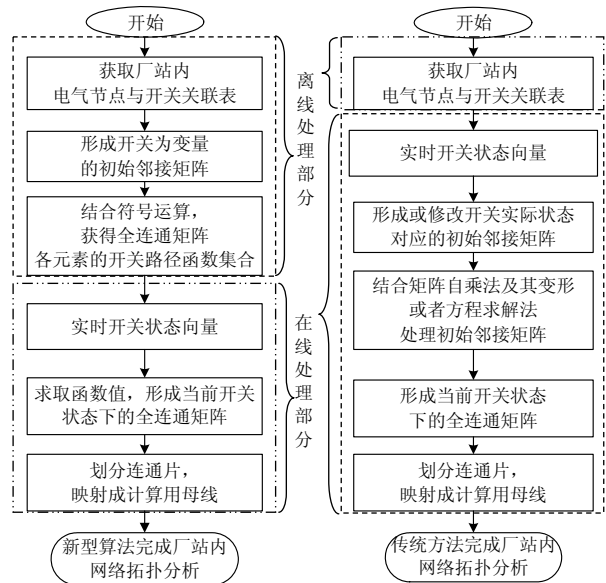


图 4 厂站内网络拓扑新型算法与传统算法的处理流程对比

Fig. 4 Comparison of novel and conventional algorithms in process for substation configuration identification

4 算例验证

4.1 一台半断路器接线初始拓扑分析和开关变位跟踪

4.1.1 初始拓扑分析

考虑以图3所示厂站内主接线中的实际开关状态为初始状态, 则开关向量为 $C_{B1}=[1,1,0,1,0,1,0,1,1]^T$ 。将向量 C_B 作为已知量, 带入到附录表 A1 所列具体开关路径函数中求解, 所得结果如表 1 中开关向量 C_{B1} 对应元素值所示。

表 1 开关向量 C_{B1}, C_{B2}, C_{B3} 下的全连通矩阵元素值
Tab. 1 Elements of complete connection matrix with the breaker status vectors C_{B1}, C_{B2} and C_{B3}

$F(i,j)$	开关向量对应元素值			$F(i,j)$	开关向量对应元素值		
	C_{B1}	C_{B2}	C_{B3}		C_{B1}	C_{B2}	C_{B3}
$F(1,2)$	0	1	0	$F(2,3)$	0	1	0
$F(1,3)$	1	1	1	$F(2,4)$	0	1	0
$F(1,4)$	1	1	1	$F(2,5)$	1	1	1
$F(1,5)$	0	1	0	$F(2,6)$	0	1	1
$F(1,6)$	1	1	0	$F(2,7)$	1	1	1
$F(1,7)$	0	1	0	$F(2,8)$	1	1	1
$F(1,8)$	0	1	0	$F(3,4)$	1	1	1
$F(3,5)$	0	1	0	$F(4,8)$	0	1	0
$F(3,6)$	1	1	0	$F(5,6)$	0	1	1
$F(3,7)$	0	1	0	$F(5,7)$	1	1	1
$F(3,8)$	0	1	0	$F(5,8)$	1	1	1
$F(4,5)$	0	1	0	$F(6,7)$	0	1	1
$F(4,6)$	1	1	0	$F(6,8)$	0	1	1
$F(4,7)$	0	1	0	$F(7,8)$	1	1	1

在表 1 基础上, 形成全连通矩阵的上三角阵 $A_{\text{adjs_upper}}(C_B)$, 并进一步由 $A_{\text{adjs_upper}}(C_B) \oplus A_{\text{adjs_upper}}^T$ 得到全连通矩阵 A_{adjs} , 则全连通矩阵 A_{adjs} 的完整矩阵形式为

$$A_{\text{adjs}} = A_{\text{adjs_upper}}(C_B) + A_{\text{adjs_upper}}^T(C_B) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

进一步, 可以按照①—⑧行向量是否线性相关

进行连通片的划分。显然, 主接线中电气节点划分为 2 组, ①、③、④、⑥为一个连通片, 而②、⑤、⑦、⑧为另一个连通片, 每个连通片都映射成一条计算用母线, 即在当前开关开合状态下, 本厂站最终拓扑分析出 2 条计算用母线, 从而完成了厂站内的初始拓扑分析。

4.1.2 开关“合”事件跟踪

在图 3 所示主接线的基础上, 考虑断路器 7 闭合时的开关“合”事件拓扑跟踪效果, 此时主接线如图 5 所示。主接线所对应的开关向量更改为 $C_{B2}=[1,1,0,1,0,1,1,1,1]^T$ 。显然, 从主接线开关状态具体情况可以判断出只有一条计算用母线生成, 即节点①—⑧属于一组, 在同一个连通片中。

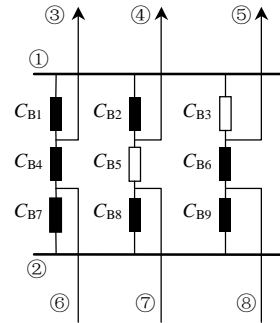


图 5 考虑 C_{B7} 发生“合”事件

Fig. 5 One and a half breakers connection with C_{B7} closed

类似于初始拓扑过程, 此时附录表 A1 中的各函数表达式的值如表 1 中开关向量 C_{B2} 对应元素值所示。得到的全连通矩阵为

$$A_{\text{adjs}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

可见所有节点划分为一组, 电气节点①—⑧形成一个连通片, 映射成一条计算用母线, 与上述从主接线直观得到的结果完全吻合。

4.1.3 开关“开”事件跟踪

在图 5 的基础上, 考虑断路器 4 打开, 如图 6 所示。此时对应开关向量为 $C_{B3}=[1,1,0,0,0,1,1,1,1]^T$, 代入附录表 A1 中各函数表达式得到的值如表 1 中开关向量 C_{B3} 对应元素值所示。得到的全连通矩

阵为

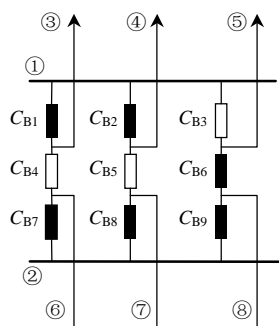


图 6 考虑 C_{B4} 发生“开”事件

Fig. 6 One and a half breakers connection with C_{B4} opened

$$A_{\text{adj}s} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

由行向量或者列向量的线性相关与否，电气节点①—⑧划分为 2 个连通片，其中节点①、③、④为一个连通片，节点②、⑤、⑥、⑦、⑧为另一个连通片。换言之，在断路器 4 打开后的开关状态下，厂站主接线映射成 2 条计算用母线。

由此可见，新算法可以有效地进行厂站内的初始拓扑分析和开关变位时的拓扑跟踪。

4.2 算法运行速度分析与比较

考虑以图 3 所示的一台半断路器接线的厂站内拓扑分析为例，在主频 1.79 GHz、1 GB 内存、处理器为 Intel(R)Core(TM)2 Duo CPU 的 IBM X61 笔记本上利用 VC++6.0，使用 C++ 语言分别对邻接矩阵全矩阵自乘、平方法、行扫描法、行累加法、文献[5]选取“1”元素最多向量法以及本文新方法进行编程实现。考虑到各种方法在全连通矩阵形成后，划分连通片阶段所耗时基本一致，本文仅考虑由具体开关状态获得后到全连通矩阵的形成之间的耗时。另外，由于图 3 所示主接线对应的电气节点数比较少，单次计算时间测量误差较大，因此考虑多次计算取均值，所得结果如表 2 所示。

由表 2 可知：本文提出的新方法无论是初始拓扑分析耗时，还是开关变位跟踪耗时，乃至至于总耗时都要比传统方法少很多，甚至是一个数量级的差别。值得指出的是，各种方法对初始拓扑分析以及

表 2 本文方法与传统方法在处理初始拓扑和开关变位跟踪上的耗时

Tab. 2 Relative time consumption of original analysis and status tracking in novel and conventional methods

厂站内拓扑 分析方法	分析过程各阶段耗时/ μs			总时间
	初始分析	开关“合”	开关“开”	
本文新方法	0.234	0.25	0.234	0.718
全矩阵自乘法	3.440	3.43	3.440	10.310
平方法	3.440	3.43	3.440	10.310
行扫描法	0.930	0.16	0.930	2.020
行累加法	1.090	0.15	1.090	2.330
文献[5]方法	3.120	3.59	3.130	9.840

开关变位事件跟踪的 3 次处理都是按处理初始拓扑的方式进行的，本文新方法的 3 次拓扑分析时间基本上相同，远低于其他方法的时间。行扫描法和行累加法在处理开关“合”事件上比本文方法快，其根本原因在于这两种方法只是针对邻接矩阵中“0”元素处理，减少了运算量。这种处理方式也为本文新方法在跟踪变位时如何进一步提高速度提供了借鉴。但是就总体时间而言，新方法仍然具有较为明显的优势。

5 结论

1) 本文从邻接矩阵与节点矩阵的拓扑对等性出发，在引入邻接矩阵余子式的基础上，形成了用于判断节点间连通性的开关路径函数集合，提出了基于开关路径函数集的厂站内拓扑新方法。新方法借助于符号运算，首先离线形成全连通矩阵中各元素以“开关”为变量的函数表达式，然后通过把开关的实际开合状态作为已知量在线代入各表达式求取函数值的方式来直接确定全连通矩阵，从理论上避免了传统方法在在线形成初始邻接矩阵的基础上而进行大量运算获得全连通矩阵的庞大运算量，为节省拓扑时间奠定了基础。

2) 本文定义了基于广义逻辑加、乘运算的开关路径函数表达式化简原则，通过该原则可以方便地得到判断任意两个节点间连通性的最简开关路径函数。并由开关路径函数内嵌的路径信息，明晰了开关“开”、“合”事件对于连通性的判断的不同影响。编程实现结果表明新型厂站内拓扑分析方法进行初始拓扑分析时间短，跟踪开关变位快，较之于传统算法节省了大量在线拓扑时间。

3) 提出的连通性判别方法适用于节点规模比较适中的网络。针对节点规模较大、结构比较复杂的网络，所形成的连通路函数集合会出现数目庞

大、生成存储困难的问题。因此,本文着重讨论了新方法在节点规模较小的厂站内拓扑分析过程中的应用情况,效果良好。同时,新方法可以为其他一定节点规模网络的路径寻优问题提供参考。

参考文献

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985: 166-188.
Yu Erkeng. Power system state estimation[M]. Beijing: Water Power Press, 1985: 166-188(in Chinese).
- [2] 孙宏斌, 张伯明, 吴文传, 等. 面向中国智能输电网的智能控制中心[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(2): 2-7.
Sun Hongbin, Zhang Boming, Wu Wenchuan, et al. Smart control center for chinese smart transmission grids [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(2): 2-7(in Chinese).
- [3] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传, 等. 智能电网控制中心技术的未来发展[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 21-28.
Zhang Boming, Sun Hongbin, Wu Wenchuan, et al. Future development of control center technologies for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 21-28(in Chinese).
- [4] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 10-12, 16.
Wang Xiangzhong, Li Xiaolan. Topology identification of power network based on incident matrix[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-12, 16(in Chinese).
- [5] 宋少群, 朱永利, 于红. 基于图论与人工智能搜索技术的电网拓扑跟踪方法[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 45-49.
Song Shaoqun, Zhu Yongli, Yu Hong. A power network topology tracking method based on graph theory and artificial intelligence search technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 45-49 (in Chinese).
- [6] 梅念, 石东源, 段献忠. 基于图论的电网拓扑快速形成与局部修正新方法[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 35-39.
Mei Nian, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong. A novel method for fast power network topology formation and partial revision based on graph theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 35-39(in Chinese).
- [7] 殷剑宏, 吴开亚. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 26-36.
Yin Jianhong, Wu Kaiya. Graph Theory and its algorithms[M]. Hefei: China Science and Technology University Press, 2003: 26-36(in Chinese).
- [8] Goderya F, Metwally A A, Mansour O. Fast detection and identification of islands in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(1): 217-221.
- [9] 于雨, 陈云山, 王大为. 电网连通性检测方法的探讨[J]. 电力学报, 1999, 14(3): 183-188.
Yu yu, Chen Yunshan, Wang Dawei. The study of testing method of electric network connection[J]. Journal of Electric Power, 1999, 14(3): 183-188(in Chinese).
- [10] 马昭彦. 高斯消元法在图计算中的应用[J]. 辽宁电机工程学报, 1984, 4(3): 46-52, 31.
Ma Zhaoyan. Application of Gaussian elimination algorithm in graph calculation[J]. Proceedings of the LSEE, 1984, 4(3): 46-52, 31(in Chinese).
- [11] 华健, 韩学山, 王锦旗, 等. 改进高斯消元算法在电力系统拓扑结构分析中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 57-61.
Hua Jian, Han Xueshan, Wang Jinqi, et al. Application of improved gaussian elimination algorithm in power system topology analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 57-61 (in Chinese).
- [12] 华健. 电力系统拓扑分析的高斯消元法及其研究应用[D]. 济南: 山东大学, 2007.
Hua Jian, The research of Gaussian elimination method in power system topology analysis and its application [D]. Ji'nan: Shandong University, 2007(in Chinese).
- [13] 姚玉斌, 王丹, 吴志良, 等. 方程求解法网络拓扑分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 79-83.
Yao Yubin, Wang Dan, Wu Zhiliang, et al. Network topology analysis by solving equation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 79-83(in Chinese).
- [14] 姚玉斌. 一种电力系统的网络拓扑分析方法[P]. 中国专利: 101499658, 2009-08-05.
Yao Yubin. A network topology analysis method for power system[P]. Chinese Patent: 101499658, 2009-08-05(in Chinese).
- [15] 于锴. 网络拓扑分析算法的研究与设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
Yu Kun. The study and design of network topology algorithms[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008(in Chinese).
- [16] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 24-55.
Zhang Boming, Chen Shousun, Yan Zheng. Advanced power network analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 24-55(in Chinese).
- [17] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1986: 208-252.
Liu Wanshun. Power system fault analysis[M]. Beijing: Electric Power Press, 1986: 208-252(in Chinese).
- [18] 张晋芳, 王增平, 张亚刚, 等. 基于虚拟阻抗的厂站内拓扑分析新方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 187-194.
Zhang Jinfang, Wang Zengping, Zhang Yagang, et al. A

novel method of substation configuration based on virtual impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 187-194(in Chinese).
 [19] 吕昊, 付立军, 叶志浩, 等. 几种电力网络图的连通路径拓扑算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009,

37(21): 81-85.
 Lü Hao, Fu Lijun, Ye Zhihao, et al. Some topology algorithm research of power network connectivity path [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 81-85(in Chinese).

附录 A

表 A1 全连通矩阵中各非对角元素的开关路径函数表达式

Tab. A1 Breaker-path Functions for non-diagonal elements in the upper complete connection matrix

$F(i,j)$	开关路径函数
$F(1,2)$	$(C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(1,3)$	$(C_{B1}) \oplus (C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(1,4)$	$(C_{B2}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B5} \otimes C_{B8} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(1,5)$	$(C_{B3}) \oplus (C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7})$
$F(1,6)$	$(C_{B1} \otimes C_{B4}) \oplus (C_{B7} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B7} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(1,7)$	$(C_{B2} \otimes C_{B5}) \oplus (C_{B8} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B8} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7})$
$F(1,8)$	$(C_{B3} \otimes C_{B6}) \oplus (C_{B9} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7}) \oplus (C_{B9} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8})$
$F(2,3)$	$(C_{B4} \otimes C_{B7}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(2,4)$	$(C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(2,5)$	$(C_{B6} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7})$
$F(2,6)$	$(C_{B7}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(2,7)$	$(C_{B8}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7})$
$F(2,8)$	$(C_{B9}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8})$
$F(3,4)$	$(C_{B1} \otimes C_{B2} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7})$
$F(3,5)$	$(C_{B1} \otimes C_{B3} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7})$
$F(3,6)$	$(C_{B4}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B7} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B7} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(3,7)$	$(C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B8} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(3,8)$	$(C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B9} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6})$
$F(4,5)$	$(C_{B2} \otimes C_{B3}) \oplus (C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B9} \otimes C_{B6} \otimes C_{B2}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7})$
$F(4,6)$	$(C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B2}) \oplus (C_{B7} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B7}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8})$
$F(4,7)$	$(C_{B5}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B8} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B8} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(4,8)$	$(C_{B2} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6}) \oplus (C_{B9} \otimes C_{B9} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B5} \otimes C_{B8} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6})$
$F(5,6)$	$(C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B3}) \oplus (C_{B7} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8} \otimes C_{B7}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(5,7)$	$(C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B3}) \oplus (C_{B8} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9})$
$F(5,8)$	$(C_{B6}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B9} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B9} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7})$
$F(6,7)$	$(C_{B7} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B8}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B9} \otimes C_{B7})$
$F(6,8)$	$(C_{B7} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6}) \oplus (C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B7} \otimes C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B8} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6})$
$F(7,8)$	$(C_{B8} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B3} \otimes C_{B6}) \oplus (C_{B2} \otimes C_{B5} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B9}) \oplus (C_{B3} \otimes C_{B6} \otimes C_{B1} \otimes C_{B4} \otimes C_{B7} \otimes C_{B8})$



王增平

收稿日期: 2012-06-01。

作者简介:

王增平(1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化等, wangzp1103@sina.com.cn。

(责任编辑 张玉荣)