

文章编号: 1000-8152(2001)05-0726-06

电力系统结线分析的有色 Petri 网方法*

赖晓平

(山东大学威海分校控制工程系·威海, 264209)

周鸿兴

王 良

(山东大学数学与系统科学学院·济南, 250100) (山东大学威海分校电子系统工程系·威海, 264209)

摘要: 从离散事件动态系统角度考虑电力系统结线分析问题, 提出了基本分析单元的有色 Petri 网模型以及基于该 Petri 网的结线分析算法. Petri 网中的令牌代表结线分析中的结点, 令牌的颜色表示连接在同一个结点上的元件, 变迁将包含相同元件的结点连接在一起. 论文对基于 Petri 网的结线分析算法及传统的算法进行了比较, 并计算了一个模型系统各变电站的结点及网络的结线, 表明了该方法的可行性及有效性.

关键词: 结线分析; Petri 网; 有色令牌

文献标识码: A

A Coloured Petri-Net Based Algorithm for the Topology Analysis of Power Networks

LAI Xiaoping

(Department of Control Engineering, Shandong University at Weihai · Weihai, 264209, P. R. China)

ZHOU Hongxing

(College of Mathematics and System Science, Shandong University · Jinan, 250100, P. R. China)

WANG Liang

(Department of Electronic System Engineering, Shandong University at Weihai · Weihai, 264209, P. R. China)

Abstract: This paper studies the topology analysis of power networks from the point of view of DEDS and proposes a coloured Petri-net for the elementary analysis unit and a coloured Petri-net based topology analysis algorithm. In the Petri-net, most tokens represent buses in power network topology, the color of the token represents the node set of the corresponding bus, and most transitions combine two buses with the same nodes into one bus. Comparison with the traditional algorithm and identification of the electrical island and nodal connectivity of a model system demonstrate the feasibility and effectiveness of the coloured Petri-net based analysis algorithm.

Key words: topology analysis of power networks; Petri-net; coloured tokens

1 引言(Introduction)

当代的电力系统一直向着大机组、大容量和超高压的方向发展, 电力系统的结构和运行方式日趋复杂, 并对调度自动化提出了越来越高的要求. 经济调度问题是电力系统的基本问题之一, 由于电力系统的调度是通过操作一系列开关的闭合或释放而完成的, 因此可以把它看成为一个离散事件过程. 近一二十年来, 通过对大量复杂系统的离散事件过程的研究产生了 DEDS 理论, 并使 DEDS 在理论和应用方面都取得了迅速的发展^[1~3]. 从离散事件角度, 用 DEDS 的理论和方法来研究电网调度问题更是一个

全新的课题, 它对当前 DEDS 这一学科领域继续发展具有重要意义, 同时, 通过这一课题的研究, 将对电网调度系统的性质有一个新的认识.

电力系统开关状态的变化是一种典型的离散事件, 开关状态的变化引起电力系统网络结线的变化, 是一种典型的离散事件动态过程. Petri 网是离散事件动态系统的一种强有力的建模工具, 已成功地应用于电力系统故障段估计^[4]及系统恢复^[5]等电力系统自动化领域. 本文将用有色 Petri 网模型对实时结线分析这一离散事件动态过程进行建模, 提出基于 Petri 网的结线分析算法, 并与传统的结线分析算法

* 基金项目: 国家自然科学基金(69774002)资助项目.

收稿日期: 1999-09-15; 收修改稿日期: 2000-06-06.

进行比较。

2 结线分析及 Petri 网的基本概念 (Basic concepts of power network topology analysis and Petri-nets)

2.1 结线分析 (Power network topology analysis)

电力系统开关状态的变化,可能使变电站的母线段对应的计算用结点发生变化,还可能引起电网开环、合环、解列或并列等。结线分析时,把一次接线图中的开关、输电线、变压器、发电机及负荷的端点称为元件,通过闭合开关连接在一起的元件集合称为结点,输电线或变压器称为支路,通过支路连接在一起的结点集合称为子系统。结线分析的第一步是厂站的结点分析,任务是分析每个厂站所属的元件由闭合开关连接成多少个结点。第二步是系统网络分析,任务是分析整个系统的结点由支路连接成多少个子系统。

传统的结线分析方法是利用堆栈技术进行搜索^[6],即用一个堆栈存放具有中间分支的元件,沿某条分支向前搜索,把由闭合开关连接在一起的元件划分为一个结点;再从另一个未划分结点号的元件出发,采用同样的搜索方法,直到所有元件都分配结点号。文献^[7]提出的局部拓扑的快速算法,当开关状态发生变化时,只搜索断开开关所在的厂站电压等级,提高了结线分析的效率。

2.2 Petri 网 (Petri-nets)

Petri 网是描述系统组织结构和系统状态动态变化的一种系统模型,它是由库所(用圆圈表示)、变迁(用短粗线表示)、连接库所和变迁的有向弧及初始标识构成的。库所中置以称为令牌的小黑点表示系统的状态,因此系统的状态可用一个维数等于库所个数的数组来表示,数组的每个元素代表相应库所的令牌数。称这一数组为网的标识。每个变迁都有一个护卫函数与之相关联,用于检验变迁是否适合动作。图 1 是一个典型的 Petri 网,由 6 个库所、3 个变迁及 11 条有向弧构成,库所 P_1, P_2, P_3 及 P_5 有一个令牌。

系统状态的变化是通过令牌的传递来实现的。如果变迁 t 的所有输入库所(存在该库所到 t 的弧)都至少有一个令牌,则称变迁 t 是使能的。一个使能的变迁若其护卫函数成真,则称此变迁是激活的。一个激活的变迁 t 可以被引发,发生时先从它的每个输入库所取一个令牌,再给它的每个输出库所(存在 t 到该库所的弧)放一个令牌。

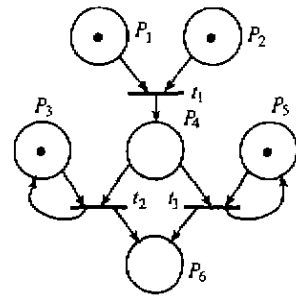


图 1 一个典型 Petri 网

Fig. 1 A typical Petri-net

图 1 的 t_1 是使能的,若其护卫函数成真,则是激活的,可以引发。 t_1 发生后, P_1, P_2 没有令牌, P_4 有一个令牌。此时, t_2, t_3 均被使能,若它们的护卫函数又都成真,则都是激活的,可以引发。但一个变迁发生后,另一个变迁就变为不是使能的,因此这两个变迁不能同时发生。称这种情况为冲突。冲突发生时,需施加控制,选择其中一个变迁发生。

2.3 有色 Petri 网 (Coloured Petri-nets)

在文献^[8]中可以见到有色 Petri 网的形式定义。本文只在一些主要的方面指出有色 Petri 网的特别之处。在前面给出的 Petri 网中,虽然不同库所的令牌可能代表不同的资源,但是同一个库所中的所有令牌是不能有任何区别的,同一个库所只能存放同一类资源。变迁发生的结果就是令牌从输入库所传递到输出库所。若给令牌赋予一种称之为颜色的内禀属性,则即使是同一个库所中的令牌,因其颜色不同,可能代表不同的资源,从而同一个库所可能存放不同类型的资源。相应地,变迁的发生就可能不只是简单地传递令牌,而是要对从输入库所取来的令牌经过加工,变成新颜色的令牌后再传递给输出库所。这就是有色 Petri 网的两个特别之处,即:令牌是有颜色的;变迁的发生可以改变令牌的颜色。

3 基本分析单元的有色 Petri 网模型 (Coloured Petri-nets for elementary analysis units)

比较电力系统结线分析的第一步和第二步,结点分析是要计算一组元件被闭合开关连接为多少个结点,网络结线分析则是要确定一组结点被支路连接为多少个子系统。若把网络结线分析中的结点看作结点分析中的元件,把网络结线分析中的子系统看作结点分析中的结点,把支路看作闭合开关,则这两步在数学上是完全相同的一个问题。另外,对不同厂站的不同电压等级,结点分析是相互独立的,因此一个电力系统的结线分析可以划分为若干个基本分析单元。基本分析单元可以描述如下。

设一个基本分析单元有 N 个元件、 M 个开关。

N 个元件的编号为 $E_1, E_2, \dots, E_N$, 元件号集合为 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$. M 个开关为 $K_1, K_2, \dots, K_M$. 若开关 K_i 的始端元件号为 $n_{i1} \in E$, 终端元件号为 $n_{i2} \in E$, 则此开关可表示为 (n_{i1}, n_{i2}) . 若开关 (n_{i1}, n_{i2}) 闭合, 则元件 n_{i1} 和 n_{i2} 连接在同一个结点上, 该结点还可能通过其它开关把其它元件连接在一起. 基本分析单元就是要确定编号为 $E_1, E_2, \dots, E_N$ 的 N 个元件被 M 个开关 $K_1, K_2, \dots, K_M$ 中的闭合开关连接为多少个结点, 每个结点由哪些元件组成.

从传统结线分析过程可以看到, 在整个过程中起核心作用的是结点, 结点在分析过程中流动, 流动过程中结点包含的元件发生变化. 由此可以想到, 把结点看成 Petri 网中流动的令牌, 结点所包含的元件集看成令牌的颜色, 结点分析过程就是将元件加工成结点的过程.

称元件号集合 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$ 为基本颜色集. 记基本颜色集 E 的幂集为 C , 则 $C = 2^E = \{c \mid c \subseteq E\}$, 即 $\forall c \in C, c = \{\}$ 或 $c = \{n_1, n_2, \dots, n_m\} (1 \leq m \leq N)$, 其中 $\forall n_i, n_j \in c$ 都有 $n_i \in E, n_j \in E$ 且当 $i \neq j$ 时, $n_i \neq n_j$. 令牌的颜色是幂集 C 的一个元素. 称 $c = \{\}$ 为 Null 色, $c = \{n_1\}$ 为基本色, $c = \{n_1, n_2\}$ 为双色. 双色构成的子集记为 C_2 .

令牌的颜色是令牌的完全表征, 下面对令牌及令牌的颜色有时不加区分, 都用集合 C 中的元素表示. 基本分析单元的 Petri 网如图 2 所示. 下面从库所、令牌颜色、变迁及初始标识等几个方面来介绍这一 Petri 网模型.

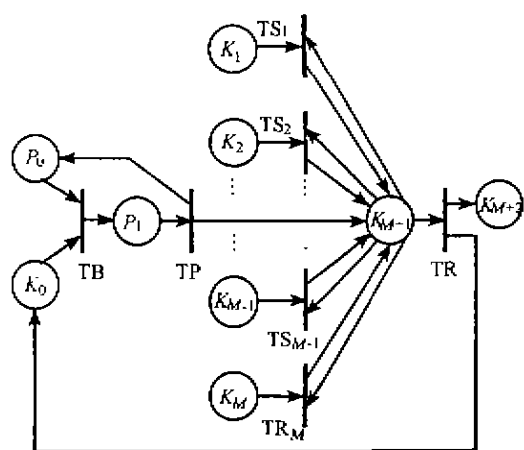


图 2 基本分析单元的 Petri 网

Fig 2 The Petri-net for an elementary analysis unit

1) 库所.

库所分为两类: P 库所和 K 库所. 库所 $K_1 \sim K_M$ 与开关 $K_1 \sim K_M$ 相对应, P_0 是元件库, K_{M+2} 是结点库, P_1 表示传送元件的传送带, K_0 表示传送结点的传送带, K_{M+1} 则相当于一个加工车间.

2) 令牌颜色的物理含义.

两种库所的令牌, 其颜色有不同的含义. P 库所的令牌颜色表示等待处理的元件, K 库所的令牌颜色则表示连接在同一结点上的元件. 当颜色表示连接在同一个结点上的元件时, 例如, 基本色 $\{E_i\}$ 表示元件 E_i 自身相连, 混合色 $\{E_1, E_2, E_3\}$ 表示元件 E_1, E_2 及 E_3 相连在同一结点, Null 色表示空连接.

P_0 有颜色为 $\{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ 的令牌, 表示编号 $n_1 \sim n_m$ 的 m 个元件等待处理. P_1 有令牌, 表示传送带在运转, 令牌颜色 $\{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ 表示传送带上有 m 个元件 $n_1 \sim n_m$. 库所 $K_i (1 \leq i \leq M)$ 的令牌颜色只允许取 $\{n_{i1}, n_{i2}\}$, 其中 $n_{i1} \in E, n_{i2} \in E$ 分别是开关 K_i 的始端及终端元件, $\{n_{i1}, n_{i2}\} \in C_2$. 初始状态下, 库所 $K_i (1 \leq i \leq M)$ 有一个令牌表示开关 K_i 闭合, 无令牌表示开关 K_i 断开. K_0, K_{M+1} 及 K_{M+2} 的令牌, 颜色取值域都是 C . K_{M+2} 的一个令牌表示一个结点, 令牌颜色 $c = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ 表示这一结点包含编号为 $n_1, n_2, \dots, n_m$ 的 m 个元件.

3) 变迁.

变迁分四种: TP 变迁、TS 变迁、TR 变迁及 TB 变迁. 变迁总数为 $M + 3$.

TP 变迁有一个输入 P 库所、一个输出 P 库所和一个输出 K 库所. TP 变迁的发生把来自输入库所的令牌 $\{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ 分成颜色为 $c_1 = \{n_1\}$ 及 $c_2 = \{n_2, n_3, \dots, n_m\}$ 的两个令牌, 然后将 c_1 传递给输出 K 库所, c_2 传递给输出 P 库所. TP 变迁的护卫函数只有当输入库所的令牌不是 Null 时才为真. TP 变迁的作用是从传送带的元件中拣出一个送到加工车间, 其余元件送回元件库.

TS 变迁有两个输入库所及一个输出库所, 均为 K 库所. 变迁的发生将来自输入库所的两个令牌 c_1 和 c_2 粘在一起, 变成新的令牌 $c = c_1 \cup c_2$ 后, 传递给输出库所. TS 变迁的护卫函数, 只有当来自两个输入库所的令牌 c_1 和 c_2 有相同的颜色成分, 即 $c_1 \cap c_2 \neq \{\}$ 时才成真. TS 变迁的作用是把两个包含相同元件的结点粘在一起.

TR 变迁只有一个输入库所, 有若干个输出库所. TR 变迁不改变令牌的颜色, 只单纯地传递令牌, 即将输入库所的令牌原封不动地传递给输出库所. TR 变迁的护卫函数总是真.

TB 变迁有一个输入 P 库所、一个输入 K 库所和一个输出 P 库所. 变迁发生时, 从输入 P 库所和输入 K 库所取令牌 c_p 和 c_k , 加工成新颜色的令牌 $c'_p = c_p - c_k$ 后传递给输出 P 库所. TB 变迁的护卫函数总

是真, TB 变迁的作用是把已经连接为结点的元件从元件库中销毁。

4) 初始标识。

对 $1 \leq i \leq M$, 若开关 K_i 闭合, 则库所 K_i 有一个令牌, 令牌颜色为 $\{n_{i1}, n_{i2}\}$, 其中 $n_{i1} \in E, n_{i2} \in E$ 分别是开关 K_i 的始端及终端元件号; 若开关 K_i 开断, 则库所 K_i 无令牌。库所 P_0 有一个令牌, 颜色为 $\{E_1, E_2, \dots, E_N\}$ 。库所 K_0 有一个令牌, 为 Null 色。其他库所无令牌。

5) 外加控制。

图 2 的 Petri 网具有冲突结构。库所 K_{M+1} 有令牌时, 可能有若干个 TS 变迁是使能的, 若它们的护卫函数又成真, 则这些 TS 变迁是激活的, 可以引发。库所 K_{M+1} 有令牌时, 变迁 TR 也是激活的, 也可以引发。因此, K_{M+1} 有令牌时可能产生冲突。产生冲突时, TS 变迁总是优先发生, 表示结点总是在连接完整以后才进入结点库。

6) 终止运行的条件及运行结果。

当 P_1 有颜色为 Null 的令牌时, Petri 网终止运行, 到达终态。此时, 库所 K_{M+2} 有若干个令牌。库所 K_{M+2} 中的一个令牌就是一个结点, 令牌颜色所包含的基本色就是和这个结点相连的元件。

4 基于 Petri 网的结线分析算法及与传统方法的比较 (Petri-net based topology analysis algorithm and comparison with the traditional method)

前面已经指出, 在数学上, 厂站电压等级的结点分析和系统网络分析是相同的问题, 都可以用图 2 的基本分析单元的 Petri 网来进行。用于系统网络分析时, 集合 E 就是结点集, 令牌代表子系统, 令牌的颜色代表子系统内的结点集, 库所 K_i 对应的是支路 L_i 。因此, 用图 2 的基本分析单元可构成下面基于 Petri 网的结线分析算法。

4.1 基于 Petri 网的结线分析算法 (Petri-net based topology analysis algorithm)

1) 结点分析。对开关状态有变化的厂站电压等级, 根据变化后的开关状态设置对应分析单元 Petri 网的初始标识, 运行 Petri 网, 计算该厂站电压等级的结点, 包括结点个数及每个结点包含的元件, 对结点进行编号。

2) 系统网络分析。

a) 根据支路两端的元件号确定支路两端的结点数。

b) 用基本分析单元 Petri 网计算子系统数及每

个子系统包含的结点。

3) 若开关状态发生变化, 则返回 1)。

应用上面的算法时, 第一次循环应认为所有的厂站电压等级都有开关状态的变化。

4.2 与传统方法的比较 (Comparison with the traditional method)

传统的结线分析算法是从某个元件出发, 用一个堆栈存放具有中间分支的元件, 沿某条分支向前搜索, 把由闭合开关连接在一起的元件划分为一个结点; 再从另一个未划分结点号的元件出发, 采用同样的搜索方法, 直到所有元件都分配结点号。一个元件的每个中间分支与连接到该元件的开关相对应。在一个结点的搜索过程中, 除了初始元件外, 每个元件的中间分支中都包含一个已经处理过的开关, 沿这条分支的搜索是一种浪费。每个结点的搜索都包含一个进栈过程和一个退栈过程, 这实际是重复搜索。

利用图 2 的 Petri 网进行结线分析时, 不会出现上述两个问题。但运行 Petri 网时, 判断哪些 TS 变迁为激活变迁要做不少的工作, 直接对上节定义的令牌颜色进行处理 (集合运算) 也要费不少时间。通过利用元件-开关关联信息进行辅助判断及对令牌颜色进行二进制编码, 这些问题可以得到解决。因此, 基于本文 Petri 网的结线分析算法将比传统的利用堆栈进行搜索的算法效率要高。当开关状态发生变化时, 本文算法只重新计算有开关状态变化的厂站电压等级的结点, 这是比传统算法效率高的另一个原因。

对上面的 Petri 网作适当的改进就可用于描述开关状态变化引起网络结线变化的动态过程, 基于改进 Petri 网的结线分析算法^[9]只重新计算受变化的开关状态影响的结点, 进一步提高了结线分析效率。

5 模型系统计算实例 (Simulations on a model system)

作为应用例子, 本文将考虑一个有代表性的模型系统来说明结线分析 Petri 网的运行过程。模型系统如图 3 所示, 包括三个不同结线型式的变电站, 变电站用三角形的数字来标号。该系统共包含 20 个结点、19 个开关、5 条支路。图中, 开关用小方框表示, 支路用 L 标注。假定开关 3, 4, 9, 10, 13 开断, 其它开关闭合。

例 1 计算模型系统变电站 1 的结点。

图 3 的模型系统中, 变电站 1 共有 8 个元件, 9 个开关, $M = 9, N = 8$, 元件号集合为 $E = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ 。9 个开关如表 1 所示。开关 K_3, K_4 及 K_9 开断, 其它开关闭合, 闭合开关前加“*”。

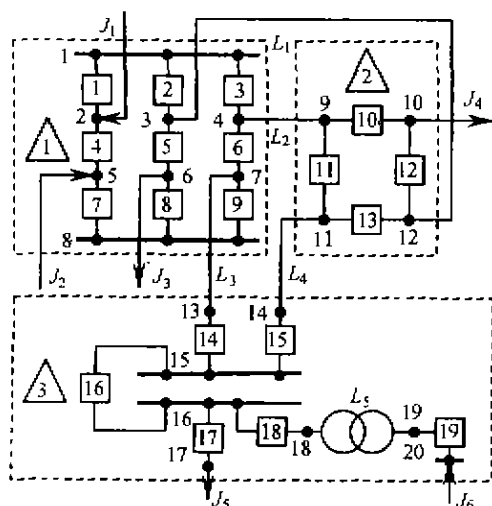


图3 模型系统

Fig. 3 A model system

表1 变电站1的开关

Table 1 Breakers of substation 1

开关	两端元件	开关	两端元件
K_1	$\ast (1,2)$	K_6	$\ast (4,7)$
K_2	$\ast (1,3)$	K_7	$\ast (5,8)$
K_3	$(1,4)$	K_8	$\ast (6,8)$
K_4	$(2,5)$	K_9	$(7,8)$
K_5	$\ast (3,6)$		

表2 例1 Petri网的状态变化

Table 2 States of the Petri-net in Example 1

步	令牌分布	使能变迁	激活变迁	发生变迁
1	$K_1, K_2, K_5, K_6, K_7, K_8$ 有; $P_0: \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$; $K_9: \{ \}$	TB	TB	TB
2	$K_1, K_2, K_5, K_6, K_7, K_8$ 有; $P_1: \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$	TP	TP	TP
3	$K_1, K_2, K_5, K_6, K_7, K_8$ 有; $P_0: \{2,3,4,5,6,7,8\}$; $K_{10}: \{1\}$	$TS_{1,2,5,6,7,8}; TR$	$TS_{1,2}; TR$	TS_1
4	K_2, K_5, K_6, K_7, K_8 有; $P_0: \{2,3,4,5,6,7,8\}$; $K_{10}: \{1,2\}$	$TS_{2,5,6,7,8}; TR$	$TS_2; TR$	TS_2
5	K_5, K_6, K_7, K_8 有; $P_0: \{2,3,4,5,6,7,8\}$; $K_{10}: \{1,2,3\}$	$TS_{5,6,7,8}; TR$	$TS_3; TR$	TS_3
6	K_6, K_7, K_8 有; $P_0: \{2,3,4,5,6,7,8\}$; $K_{10}: \{1,2,3,6\}$	$TS_{6,7,8}; TR$	$TS_4; TR$	TS_4
7	K_6, K_7 有; $P_0: \{2,3,4,5,6,7,8\}$; $K_{10}: \{1,2,3,6,8\}$	$TS_{6,7}; TR$	$TS_7; TR$	TS_7
8	K_6 有; $P_0: \{2,3,4,5,6,7,8\}$; $K_{10}: \{1,2,3,6,8,5\}$	$TS_8; TR$	TR	TR
9	K_6 有; $P_0: \{2,3,4,5,6,7,8\}$; $K_9, K_{11}: \{1,2,3,6,8,5\}$	TB	TB	TB
10	K_6 有; $K_{11}: \{1,2,3,6,8,5\}$; $P_1: \{4,7\}$	TP	TP	TP
11	K_6 有; $K_{11}: \{1,2,3,6,8,5\}$; $P_0: \{7\}$; $K_{10}: \{4\}$	$TS_6; TR$	$TS_6; TR$	TS_6
12	$K_{11}: \{1,2,3,6,8,5\}$; $P_0: \{7\}$; $K_{10}: \{4,7\}$	TR	TR	TR
13	$P_0: \{7\}$; $K_{11}: \{1,2,3,6,8,5\}$; $\{4,7\}$; $K_9: \{4,7\}$	TB	TB	TB
14	$K_{11}: \{1,2,3,6,8,5\}$; $\{4,7\}$; $P_1: \{ \}$	TP		

表3 模型系统各变电站的结点

Table 3 Buses of the model system

变电站	1	2	3-1	3-2
结点	1 2 3 4	5 6		
元件	1,2,3,5,6,8 4,7 9,12 10,11 13,14,15,16,17,18 19,20			

表4 模型系统的支路

Table 4 Branches of the model system

支路	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
两端元件	(3,10)	(4,9)	(7,13)	(12,14)	(18,19)
两端结点	(1,4)	(2,3)	(2,5)	(3,5)	(5,6)

结点分析的 Petri 网就是图 2 在 $M = 9, N = 8$ 的情况. 表 2 给出了运行过程中 Petri 网的状态变化及运行结果. 令牌分布栏只列出有令牌的库所, 对于库所 $K_1 \sim K_9$, 由于其令牌只能取对应开关两端元件号组成的双色, 因此只列出了有令牌的库所名. 表 2 最后一行列出的库所 K_{11} 有两个令牌: $\{1,2,3,6,8,5\}$ 和 $\{4,7\}$, 这就是变电站 1 的结点分析结果, 即: 变电站 1 被闭合开关连接为两个结点, 结点 1 包含元件 1,2,3,5,6 和 8, 结点 2 包含元件 4 和 7.

例 2 划分模型系统的子系统.

对其它两个变电站进行类似计算, 其中变电站 3 有两个电压等级: 3-1、3-2, 得到各个变电站的结点分布情况如表 3 所示. 进一步由表 3 可确定每条支路的两端结点号如表 4.

构造有色 Petri 网: $N = 6, M = 5, E = \{1,2,3,4,5,6\}$; 初始标识下, $K_1 \sim K_5$ 均有令牌, 分别是 $\{1,4\}, \{2,3\}, \{2,5\}, \{3,5\}$ 和 $\{5,6\}$. 运行 Petri 网就可得到网络划分为两个子系统: 子系统 1, 包含结点 1 和 4; 子系统 2, 包含结点 2,3,5 和 6. 运行过程中 Petri 网的状态变化及运行结果都列于表 5.

表 5 例 2 Petri 网的状态变化

Table 5 States of the Petri-net in Example 2

步	令牌分布	使能变迁	激活变迁	发生变迁
1	K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 有; $P_0: \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$; $K_6: \{1\}$	TB	TB	TB
2	K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 有; $P_1: \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$	TP	TP	TP
3	K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 有; $P_0: \{2, 3, 4, 5, 6\}$; $K_6: \{1\}$	$TS_{1,2,3,4,5}; TR$	$TS_1; TR$	TS_1
4	K_2, K_3, K_4, K_5 有; $P_0: \{2, 3, 4, 5, 6\}$; $K_6: \{1, 4\}$	$TS_{2,3,4,5}; TR$	TR	TR
5	K_2, K_3, K_4, K_5 有; $P_0: \{2, 3, 4, 5, 6\}$; $K_7: \{1, 4\}$; $K_6: \{1, 4\}$	TB	TB	TB
6	K_2, K_3, K_4, K_5 有; $K_7: \{1, 4\}$; $P_1: \{2, 3, 5, 6\}$	TP	TP	TP
7	K_2, K_3, K_4, K_5 有; $K_7: \{1, 4\}$; $P_0: \{3, 5, 6\}$; $K_6: \{2\}$	$TS_{2,3,4,5}; TR$	$TS_{2,3}; TR$	TS_2
8	K_3, K_4, K_5 有; $P_0: \{3, 5, 6\}$; $K_7: \{1, 4\}$; $K_6: \{2, 3\}$	$TS_{3,4,5}; TR$	$TS_{3,4}; TR$	TS_3
9	K_4, K_5 有; $P_0: \{3, 5, 6\}$; $K_7: \{1, 4\}$; $K_6: \{2, 3, 5\}$	$TS_{4,5}; TR$	$TS_{4,5}; TR$	TS_4
10	K_5 有; $P_0: \{3, 5, 6\}$; $K_7: \{1, 4\}$; $K_6: \{2, 3, 5\}$	$TS_5; TR$	$TS_5; TR$	TS_5
11	$P_0: \{3, 5, 6\}$; $K_7: \{1, 4\}$; $K_6: \{2, 3, 5, 6\}$	TR	TR	TR
12	$P_0: \{3, 5, 6\}$; $K_7: \{1, 4\}$; $\{2, 3, 5, 6\}$; $K_6: \{2, 3, 5, 6\}$	TB	TB	TB
13	$K_7: \{1, 4\}$; $\{2, 3, 5, 6\}$; $P_1: \{1\}$	TP		

6 结论与讨论(Conclusion and discussion)

本文从离散事件动态系统角度研究了电力系统结线分析问题,提出了基本分析单元的概念及基本分析单元的有色 Petri 网,用令牌表示结点,令牌的颜色表示连接在同一结点上的元件.论文还提出了基于有色 Petri 网的结线分析算法,并与利用堆栈技术进行搜索的传统算法进行了比较.在适当的技术实现下,基于有色 Petri 网的分析算法比传统算法效率高.

当某个开关状态发生变化时,本文算法需重新计算该开关所在厂站电压等级的所有结点.对上面的 Petri 网作适当的改进可以只重新计算受变化的开关状态影响的结点,进一步提高结线分析的效率.改进的 Petri 网^[9]动态描述了开关状态变化引起网络结线变化的过程.

参考文献(References)

- [1] Zheng Dazhong and Zheng Yingping. The current state and developing trends of DEDS theory [J]. Acta Automatica Sinica, 1992, 18 (2): 129 - 141 (in Chinese)
- [2] Zheng Yingping. Progresses in discrete event system theory research and application (I) [J]. Control and Decision, 1996, 11(2): 233 - 241 (in Chinese)
- [3] Zheng Yingping. Progresses in discrete event system theory research and application (II) [J]. Control and Decision, 1996, 11(3): 329 -

333 (in Chinese)

- [4] Yang C L, Yokoyama A and Sekine Y. Fault section estimation of power system using color time Petri nets [A]. Proceedings of Expert Systems Application to Power Systems [C], Melbourne (Australia), 1993, 321 - 326
- [5] Wu Jaw-Shyang. A Petri-net algorithm for multiple contingencies of distribution system operation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 1164 - 1171
- [6] Yu Erkeng. States Estimation for Power System [M]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 1985 (in Chinese)
- [7] Zhu Wendong, Liu Guangyi, Yu Erkeng and Wang Xing. The fast calculation method of local power network topology [J]. Power System Technology, 1996, 20(3): 30 - 33 (in Chinese)
- [8] Yuan Chongyi. Petri Nets [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989 (in Chinese)
- [9] Lai Xiaoping. Electric load forecasting, power network topology analysis and related problems [D]. Shandong: Shandong University, 2000 (in Chinese)

本文作者简介

赖晓平 1965 年生, 山东大学副教授. 分别于 1985 年、1988 年及 2000 年在山东大学获得学士学位、硕士学位和博士学位. 目前主要研究兴趣有电力负荷预测, DEDS 理论与应用及数字滤波器设计理论等.

周鸿兴 1941 年生, 山东大学教授, 博士生导师. 1965 年研究生毕业于山东大学数学系. 主要研究方向为分布参数控制系统, 离散事件动态系统及电力调度自动化.

王 良 1964 年生, 山东大学副教授. 于 1985 年、1988 年在山东大学获学士学位和硕士学位. 研究方向为电力调度自动化系统