

含全感割集多线圈耦合网络回路 方程的直接形成算法

雷海亮 陈振生

(山东工业大学电力系 济南 250014)

摘要 在本文作者之一的前文(1991)基础上,将尽可能多的耦合支路以及所有电流源支路选为连支,从而在不进行矩阵运算的情况下,可以根据网络的拓扑结构和元件参数直接建立含有全感割集多线圈耦合网络的以连支电流为待求量的回路电流方程。并用实例进行了说明。

关键词 网络分析,耦合电感,全感割集,算法,回路方程

1 引言

对含有多线圈耦合网络进行计算机辅助分析时,回路分析比节点法分析或改进的节点法分析具有一定的优越性^[1],其主要优点是不用求支路电感的逆矩阵^[2]或增加方程组的阶数^[3]。文献[1]所讨论网络不能存在全感割集,这就导致了该文应用的局限性。本文的目的是在文献[1]的基础上进一步讨论,当网络含有多线圈耦合且又具有全感割集时,如何根据网络拓扑和元件参数直接形成以单连支电流为待求量的网络方程。

2 网络拓扑和元件参数的安排

为了直接形成回路方程,网络的所有元件都单独作为一个支路。支路编号的优先次序是:电压源、电阻、电容、无耦合电感、有耦合电感和电流源。网络的拓扑结构和元件参数分别放在 TOPLOG, VALUE 两个数组内,两个数组中元件的顺序一致。并规定1代表电阻,2代表电容,3代表无耦合的电感,4代表有耦合线圈的自感,5代表互感,6代表电流源,7代表电压源。两个数组的格式如表1。在表1 TOPLOG 中,互感元件的始节点

表 1

TOPLOG				VALUE
元件序号	始节点	终节点	元件类型	参数
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·

1993-01-18 收到, 1993-05-07 定稿

雷海亮 男, 1946年生, 副教授, 从事电路、电磁场和电路的计算机辅助分析的教学和研究工作。

陈振生 男, 1946年生, 副教授, 从事应用电子技术专业的教学、研究以及电子束曝光机的研制工作。通信地址为山东工业大学自动化系。

和终节点栏实际列出两耦合支路的编号, 且始节点栏列出的支路号小于终节点栏列出的支路号。在 VALUE 中, 有两列, 左边一列列出电源参数的实部、电阻、电容、自感和互感参数; 右边一列列出电源参数的虚部、或容抗(负值)、自感抗(正值)和互感抗(其正、负由互感系数的正、负决定)。其中互感系数的正、负规定为当两耦合支路的参考方向都是从同名端指向另一端时, 取“正”; 否则, 取“负”。两数组中, 互感信息均列在最后面。

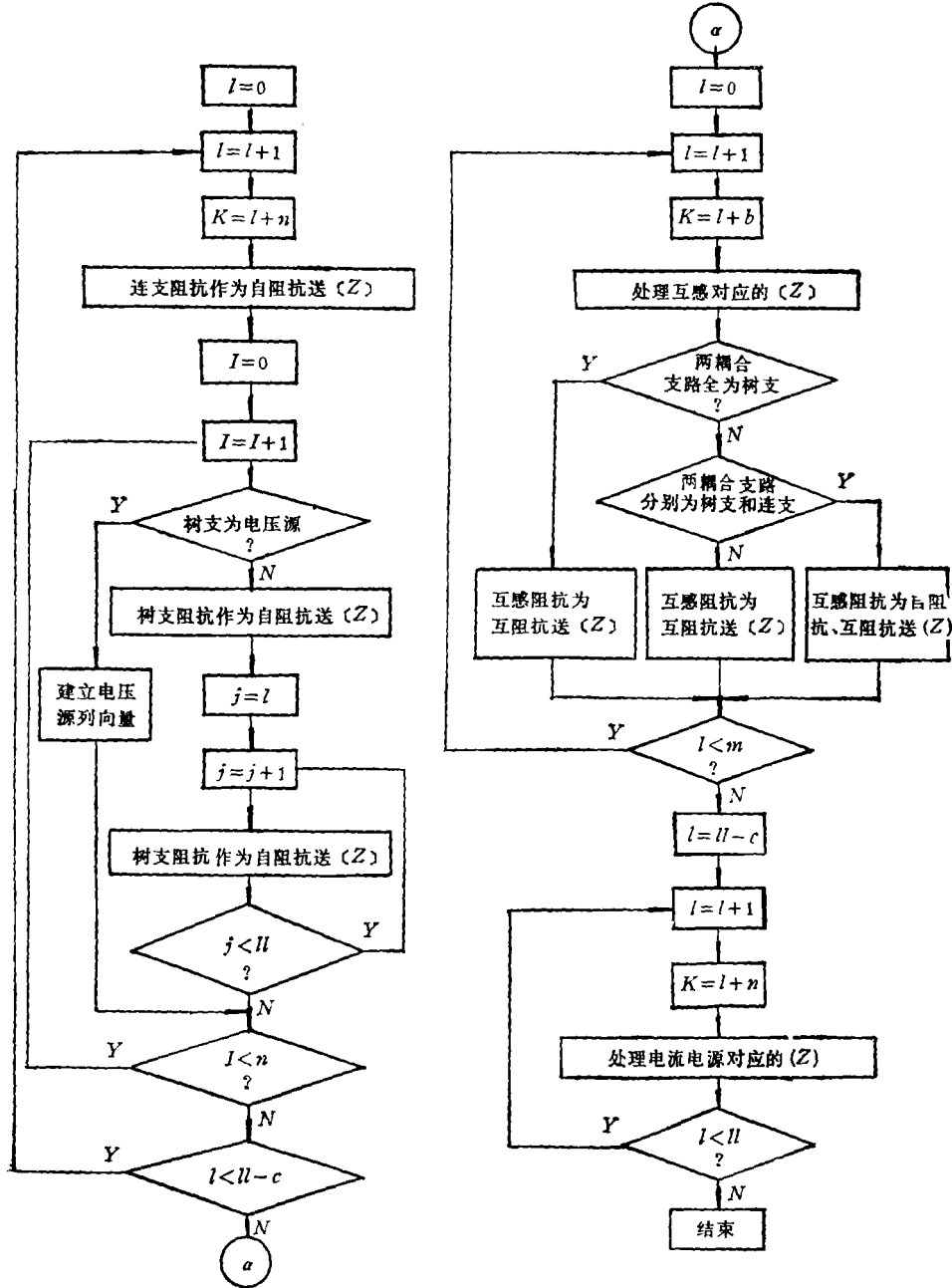


图 1 算法框图

(图中左边下面一个“树枝阻抗作为自阻抗送[Z]”应为“树枝阻抗作为互阻抗送[Z]”。
图中右边的“处理电流电源对应的(Z)”应为“处理电流源对应的[Z]”。)

3 回路方程的直接形成算法

根据文献[4]的方法, 读取 TOPLOG 数组, 选网络的一个特有树。按先树支、后连支重新把 TOPLOG 和 VALUE 数组排序。新的次序为电压源、电阻树支、电容树支、无耦合电感树支、有耦合电感树支、有耦合电感连支、电阻连支、电容连支、无耦合电感连支和电流源。

设网络有 n 个独立节点, b 个支路, m 个互感系数, c 个电流源, 则独立回路数 $l = b - n$, 基本回路矩阵 $[B_l]$ 为 $l \times b$ 阶, 且可表示为

$$[B_l] = [B, I],$$

其中 $[I]$ 为 $l \times l$ 阶的单位阵, $[B,]$ 为单连支回路与树支的关联矩阵, 阶数为 $l \times n$ 。

再根据文献[4]求得网络的基本回路矩阵 $[B_l]$ (只求得 $[B,]$ 即可) 以后, 就可利用 $[B,]$ 以及 TOPLOG 和 VALUE 数组直接形成以单连支电流为待求量的回路方程。设置一复数数组 $[Z]$, 其阶数为 $l \times (l + 1)$, 放置回路阻抗矩阵(前 l 列) 和电压源、电流源列向量(最后一列)。形成回路方程的算法框图如图 1。

4 应用举例

例 用本文算法列写图 2 电路的回路电流方程。该电路五个线圈之间有耦合, 且

表 2

TOPLOG				VALUE	
支路号	始节点	终节点	类 型	参 数	
1	1	2	7	$R_m[\dot{U}_{s1}]$	$I_m[\dot{U}_{s1}]$
2	4	6	7	$R_m[\dot{U}_{s2}]$	$I_m[\dot{U}_{s2}]$
3	2	3	1	R_3	0
4	1	0	1	R_4	0
5	1	4	1	R_5	0
6	0	7	1	R_6	0
7	0	8	4	L_7	x_{L7}
8	1	5	4	L_8	x_{L8}
9	5	6	4	L_9	x_{L9}
10	5	0	4	L_{10}	x_{L10}
11	3	0	4	L_{11}	x_{L11}
12	0	6	1	R_{12}	0
13	6	7	2	C_{13}	x_{C13}
14	8	7	6	$R_m[\dot{I}_{s14}]$	$I_m[\dot{I}_{s14}]$
15	3	8	6	$R_m[\dot{I}_{s15}]$	$I_m[\dot{I}_{s15}]$
0	7	8	5	$-m_1$	$-x_{m1}$
0	7	9	5	$-m_2$	$-x_{m2}$
0	7	10	5	$-m_3$	$-x_{m3}$
0	7	11	5	m_4	x_{m4}
0	8	9	5	m_5	x_{m5}
0	8	10	5	$-m_6$	$-x_{m6}$
0	8	11	5	m_7	x_{m7}
0	9	10	5	m_8	x_{m8}
0	9	11	5	$-m_9$	$-x_{m9}$
0	10	11	5	m_{10}	x_{m10}

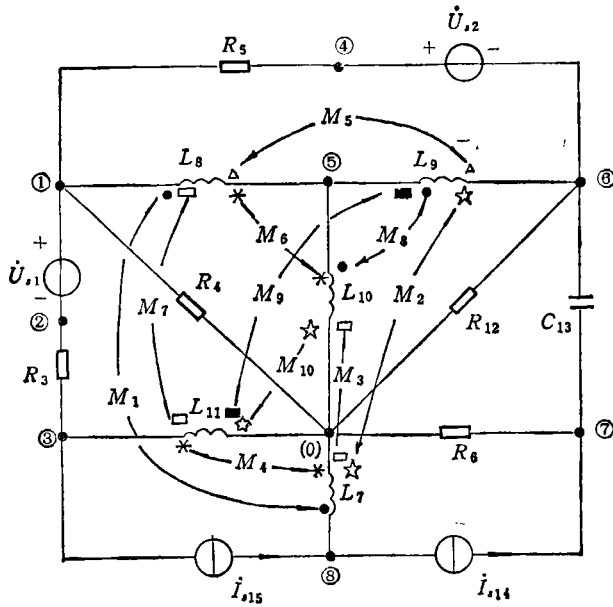


图 2 例图

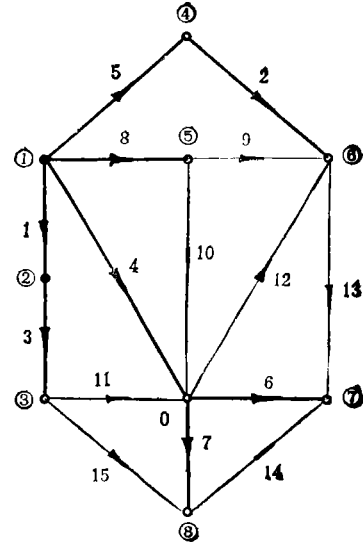


图 3 有向图

有两个全感割集, 其有向图如图 3。

根据文中要求, 选 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 支路为树支, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 支路为连支。网络的拓扑数组和参数数组已按要求排列如表 2

网络基本回路矩阵的子矩阵为

$$[B_s] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

根据本文算法, 由 TOPLOG 和 VALUE 数组和 $[B_s]$ 即可直接形成以单连支电流 $i_9, i_{10}, i_{11}, i_{12}, i_{13}, i_{14}, i_{15}$ 为待求量的回路方程。回路阻抗和电压源、电流源同时放在 $l \times (l + 1)$ 阶的增广回路阻抗矩阵内。增广回路阻抗矩阵为

$$[Z] = \begin{pmatrix} R_5 + Z_4 + Z_6 + 2Z_{m5} & Z_2 - Z_{m6} + Z_{m3} + Z_{m5} & Z_{m7} - Z_{m9} & R_5 & -R_5 & -Z_{m1} - Z_{m2} & Z_{m1} + Z_{m2} & \dot{U}_{12} \\ Z_4 - Z_{m6} + Z_{m3} + Z_{m5} & R_4 + Z_6 + Z_{10} - 2Y_{m6} & R_4 + Z_{m10} + Z_{m7} & -R_4 & R_4 & -Z_{m1} - Z_{m3} & R_4 + Z_{m1} + Z_{m3} & 0 \\ Z_{m7} - Z_{m9} & R_4 + Z_{m10} + Z_{m7} & R_3 + R_4 + Z_{11} & -R_4 & R_4 & Z_{m4} & R_3 + R_4 - Z_{m4} & -\dot{U}_{11} \\ R_5 & -R_4 & -R_4 & R_4 + R_5 + R_{12} & -R_4 - R_5 & 0 & -R_4 & \dot{U}_{12} \\ -R_5 & R_4 & R_4 & -R_4 - R_5 & R_4 + R_5 + R_4 + Z_{11} & R_4 & R_4 & -\dot{U}_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & i_{114} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & i_{115} \end{pmatrix}$$

5 结语

在文献[1]的基础上,解决了含全感割集耦合网络回路电流方程的直接建立问题。对该类网络建立方程时,本文算法比一般节点法简单,与改进节点法相比,所得方程的阶数要低得多。因此,文中提出的回路方程及其形成算法是对多线圈耦合网络进行频率分析的有效工具。

参 文 考 献

- [1] 雷海亮. 电子科学学刊,1991,13(4): 365—371.
- [2] Len O Chua, Lin Penmin. Computer Aided Analysis of Electronic Circuit — Algorithms & Computational Techniques. Englewood Chiffs, NJ: Prentice-Hall, Inc. 1975, § 4—5.
- [3] Ho C W. IEEE Trans. on CAS, 1975, CAS-22(6): 504—509.
- [4] 雷海亮,等. 山东工业大学学报,1985,(3): 63—71.

ALGORITHMS FOR DIRECTLY FORMULATING LOOP EQUATIONS OF A MULTI-WINDING COUPLED NETWORK WITH ALL-INDUCTOR CUT-SETS

Lei Hailiang Chen Zhensheng
(Shandong Polytechnic University, Jinan 250014)

Abstract By choosing the highest possible inductively coupled branches and all current sources as links, the loop equations are directly formulated. The network may contain all-inductor cut-sets. The order of the presented loop equations is less than that of the modified modal approach equations. An example is given.

Key words Network analysis, Coupled inductor, All-inductor cut-set, Algorithm, Loop equation