

Excel 在电力系统故障计算中应用

苏德佳

(福建省尤溪流域水电开发有限责任公司,福建 尤溪 365100)

摘要: 在电力系统的规划、设计与运行中,需要大量的故障计算、分析,手工计算方法是繁琐、困难的。论述了计算电路常用的节点电位法和回路电流法,即从求解节点导纳方程和节点阻抗方程而计算故障点参数。说明 Excel 是广泛应用的办公软件,具有强大的计算、数据分析和图表处理等功能。用实例阐明了 Excel 在电力系统故障计算时的方法,即建立系统等值序网络和各序网络节点导纳矩阵,用 Excel 矩阵求逆函数获得阻抗矩阵,求得阻抗方程,再计算出故障电气参数。Excel 软件的应用使故障计算准确、方便、直观。

关键词: Excel 表格;故障;节点;网络;矩阵

中图分类号: TM 744;TP 317.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-6047(2006)07-0055-04

在电力系统的规划、设计和运行中,需要进行大量故障计算与分析。随着计算机技术的发展,各种故障计算的应用软件应运而生,应用计算机进行故障分析计算,要掌握电力系统故障计算的数学模型、计算方法和程序设计等方面知识,这对于非计算机专业的人员要耗费大量的精力。在应用节点电压法或回路电流法作故障计算时,矩阵的计算十分复杂繁琐,对于较复杂的电力系统,矩阵阶数较大,手算十分困难。Excel 具有强大函数计算和图表处理功能,运用 MINVERSE(array) (返回一组数所代表矩阵的逆)、MMULT(array1, array2) (返回两组数矩阵的乘积)等矩阵函数作系统故障的计算,却十分准确、方便、直观。

1 计算电力系统故障的基本方法^[1-6]

计算电路常用方法为节点电位法和回路电流法。这 2 种方法的共同特点是把电路的计算归结为一组联立方程式的求解问题。在应用计算机计算电力系统问题时,主要考虑 2 种方法数学方程建立的难易性,节点电位法的节点方程(包括节点导纳方程和节点阻抗方程)中节点导纳方程建立容易,因此应用计算机分析电力系统故障时多采用节点电位法。

1.1 节点导纳方程求法

在 $n+1$ 个节点的等值网络中,独立节点数为 n 个,节点导纳方程为

$$YU=I \quad (1)$$

式中 I 为节点电流 n 元列向量,由各节点注入电流; U 为各节点对参考点的电压所组成的节点电压 n 元列向量; Y 为节点导纳矩阵,是 n 阶方阵。

以下为节点导纳方程求法。

a. 矩阵阶数等于电力系统节点数,当电力网络的独立节点数为 n 时,导纳矩阵为 $n \times n$ 阶方阵。

b. 导纳矩阵各对角元素,即各节点自导纳等于相应的节点所连接支路导纳之和。

c. 导纳矩阵的非对角元素等于节点 i 与节点 j 间支路导纳取负号,当节点 i 与 j 间无支路直接相连时取 0。

d. 系统中的发电机用电流源等值电路代替,并以流向节点为正,反之为负。

无论多么复杂的电力系统网络,都可以根据给定的支路参数和接线方式,直观方便地求出节点导纳矩阵。

1.2 节点阻抗方程求法

将式(1)两端左乘 Y^{-1} ,可得节点阻抗方程:

$$U=Y^{-1}I=ZI \quad (2)$$

Z 为节点阻抗矩阵,与节点导纳矩阵 Y 互为逆矩阵,而且是同阶对称的。当已知 I 和 Z 时,可以方便地由该式通过矩阵乘法得出节点电压 U 。

1.3 节点阻抗方程计算故障

为分析方便,以三相对称短路为例,应用节点阻抗方程计算节点 F 三相对称短路时的故障电流、各节点电压、支路电流。其他不对称短路计算,利用对称分量法同理可计算。在计算时,不计负荷(负荷电流较短路电流小得多)影响,近似地认为故障前的节点电压标么值等于 1,并忽略正常通过支路电流。

故障点短路电流为

$$I_F=1/Z_{FF} \quad (3)$$

式中 Z_{FF} 为故障点的自阻抗。

故障点短路电流在各节点所产生的电压分量为

$$U_{i(F)}=-Z_{Fi}I_F$$

短路后各节点电压为

$$U_i=1+U_{i(F)}=1-Z_{Fi}I_F \quad (4)$$

短路故障时通过各支路的电流为

$$I_{ij}=(U_i-U_j)/Z_{ij} \quad (5)$$

2 Excel 计算故障的实例^[7-9]

在应用 Excel 进行电力系统故障计算时,首先要建立系统等值序网络,然后按照节点导纳矩阵的求法建立各序网络节点导纳矩阵 Y ,接着应用 Excel 矩

阵求逆函数 $\text{MINVERSE}(\text{array})$ 对节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 求逆得出节点阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$, 最后应用节点阻抗方程进行故障计算。如图 1 所示系统, 在线路 ②-①上 F 点处 (离节点 ② 30 km 处) 发生三相对称短路故障时, 计算故障电流、各点电压、流经各支路电流 (图中无单位变量为标么值; $\lambda = \cos \Phi$; 图 2 及表 1、2 同)。

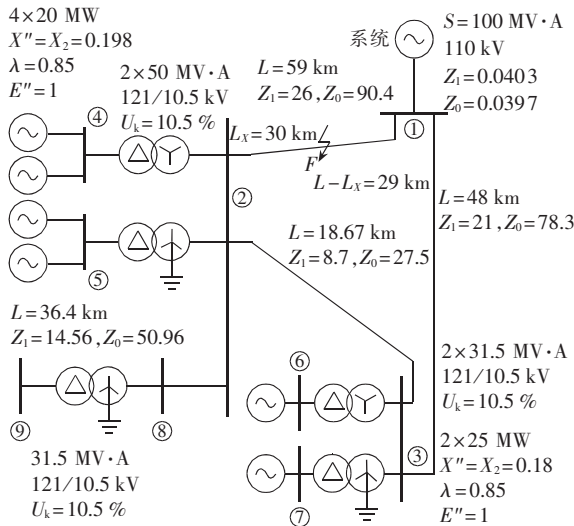
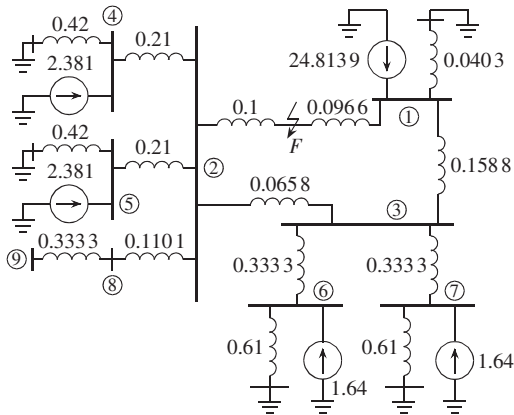


图 1 系统接线图

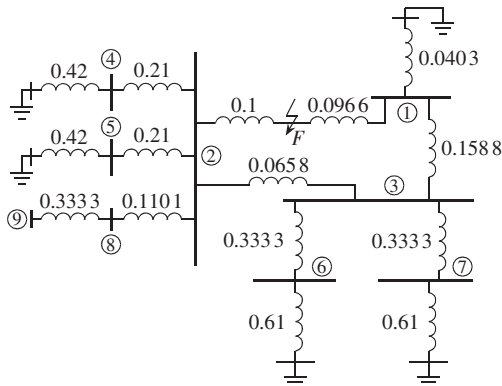
Fig.1 System connection diagram

2.1 建立系统等值序网络

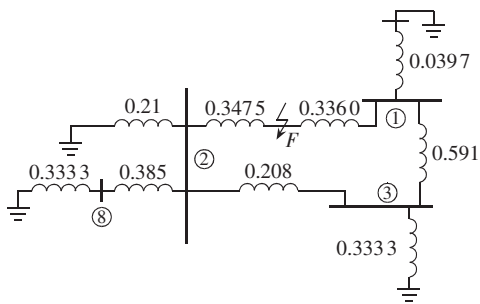
根据图 1 所示系统, 取基准功率 $S_B = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 基准电压 $U_B = U_{av}$, 将系统各元件参数换算成标么值, 形成如图 2 所示等值序网图。



(a) 正序网络



(b) 负序网络



(c) 零序网络

图 2 序网络图

Fig.2 Sequence network diagram

2.2 建立节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}$

按照节点导纳矩阵的求法, 求出等值序网络各节点自导纳和互导纳, 形成如表 1 中 10×10 阶正序、负序网络导纳矩阵 (B37:K46)、 5×5 阶零序网络导纳矩阵 (H61:L65)。

2.3 求节点阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$

应用 Excel 中矩阵求逆函数 $\text{MINVERSE}(\text{array})$ 对节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 求逆形成节点阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$, 其步骤为: 选定相同的 10×10 行列区域, 如表 1 中 (B49:K58)、插入函数 $\text{MINVERSE}(\text{array})$, array 选定 (B37:K46) 中的导纳矩阵, 同时按下 Shift + Ctrl + Enter 键, 即自动计算形成正序、负序网络的阻抗矩阵, 如表 1 中的 (B49:K58) 所示。同理, 可得零序网络的阻抗矩阵, 如表 1 中 (H61:L65) 所示。

2.4 计算 F 点故障参数

计算 F 点处三相对称短路故障时的电流、各节点电压、流经各支路电流由 3 个步骤实现。

a. 计算 F 点三相短路故障电流。根据式 (3) 可得三相对称短路故障电流 (标么值) 为

$$I_F = \frac{1}{Z_{FF}} = 10.935$$

b. 计算 F 点三相对称短路故障后的各节点电压。应用 Excel 矩阵乘积函数 $\text{MMULT}(\text{array1}, \text{array2})$, 并根据式 (4) 计算出故障后各节点电压。其步骤为: 选定如表 2 中 (E92:E101), 单元格 E101 输入故障点 F 注入正序网络短路电流 $I_F = 10.935$ 、(E92:E100) 输入 1~9 节点的注入电流 0; 选中表 2 中 (D92:D101), 插入矩阵函数 $\text{MMULT}(\text{array1}, \text{array2})$, array1 选取表 1 中正序阻抗矩阵 (B49:K58), array2 选取表 2 中电流矩阵 (E92:E101), 同时按下 Shift + Ctrl + Enter 键, 自动计算出故障点 F 注入的故障电流在各节点 i 上产生的电压分量, 见表 2 中 (D92:D101); 将 (D92:D101) 与故障前电压 (表 2 中 (C92:C101)) 相加就得到线路 ①-② 上 F 点处三相对称短路后各节点电压, 如表 2 中 (B92:B101) 所示。

c. 计算 F 点处三相短路故障时通过各支路电流。根据式 (5) 容易求出故障时通过各支路电流, 如表 2 中 (G92:G101) 所示。

表 1 节点导纳及节点阻抗矩阵
Tab.1 Node conductance and impedance matrix

K58		$f_x \{=\text{MINVERSE}(\text{B37}:\text{K46})\}$											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
35 (一)正序、负序网络节点导纳矩阵 Y													
36	节点 $\downarrow \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	F		
37	1	41.4595	0.0000	-6.2972	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-10.3483		
38	2	0.0000	43.8074	-15.1976	-4.7619	-4.7619	0.0000	0.0000	-9.0827	0.0000	-10.0034		
39	3	-6.2972	-15.1976	27.4954	0.0000	0.0000	-3.0003	-3.0003	0.0000	0.0000	0.0000		
40	4	0.0000	-4.7619	0.0000	7.1429	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
41	5	0.0000	-4.7619	0.0000	0.0000	7.1429	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
42	6	0.0000	0.0000	-3.0003	0.0000	0.0000	4.6396	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
43	7	0.0000	0.0000	-3.0003	0.0000	0.0000	0.0000	4.6396	0.0000	0.0000	0.0000		
44	8	0.0000	-9.0827	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.0830	-3.0003	0.0000		
45	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-3.0003	3.0003	0.0000		
46	F	-10.3483	-10.0034	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.3517		
47 (二)正序、负序网络节点阻抗矩阵 Z													
48	节点 $\downarrow \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	F		
49	1	0.0352	0.0235	0.0245	0.0157	0.0157	0.0159	0.0159	0.0235	0.0235	0.0295		
50	2	0.0235	0.0888	0.0634	0.0592	0.0592	0.0410	0.0410	0.0888	0.0888	0.0556		
51	3	0.0245	0.0634	0.0897	0.0423	0.0423	0.0580	0.0580	0.0634	0.0634	0.0436		
52	4	0.0157	0.0592	0.0423	0.1795	0.0395	0.0273	0.0273	0.0592	0.0592	0.0371		
53	5	0.0157	0.0592	0.0423	0.0395	0.1795	0.0273	0.0273	0.0592	0.0592	0.0371		
54	6	0.0159	0.0410	0.0580	0.0273	0.0273	0.2530	0.0375	0.0410	0.0410	0.0282		
55	7	0.0159	0.0410	0.0580	0.0273	0.0273	0.0375	0.2530	0.0410	0.0410	0.0282		
56	8	0.0235	0.0888	0.0634	0.0592	0.0592	0.0410	0.0410	0.1989	0.1989	0.0556		
57	9	0.0235	0.0888	0.0634	0.0592	0.0592	0.0410	0.0410	0.1989	0.5322	0.0556		
58	F	0.0295	0.0556	0.0436	0.0371	0.0371	0.0282	0.0282	0.0556	0.0556	0.0914		
59 (三)零序网络节点导纳矩阵 Y							(四)零序网络节点阻抗矩阵 Z						
60	节点 $\downarrow \rightarrow$	1	2	3	8	F	节点 $\downarrow \rightarrow$	1	2	3	8	F	
61	1	29.8575	0.0000	-1.6920	0.0000	-2.9766	1	0.0364	0.0084	0.0107	0.0039	0.0226	
62	2	0.0000	15.0443	-4.8077	-2.5974	-2.8773	2	0.0084	0.1020	0.0531	0.0473	0.0544	
63	3	-1.6920	-4.8077	9.5000	0.0000	0.0000	3	0.0107	0.0531	0.1341	0.0247	0.0316	
64	8	0.0000	-2.5974	0.0000	5.5977	0.0000	8	0.0039	0.0473	0.0247	0.2006	0.0253	
65	F	-2.9766	-2.8773	0.0000	0.0000	5.8539	F	0.0226	0.0544	0.0316	0.0253	0.2091	

表 2 F 点三相短路后各节点电压、故障时通过各支路电流
Tab.2 Node voltages after three-phase short-circuit at point F and branch fault currents

D92	$f_x \{=\text{MMULT}(\text{B49}:\text{K58},\text{E92}:\text{E101})\}$								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
90	三相故障节点电压($U_i=1-Z_{Fi}I_F$)					三相短路各支路电流 $I_{ij}=(U_i-U_j)/Z_{ij}$			
91	U_i	节点电压	故障前电压	$Z_{Fi}I_F$	I_F	I_{ij}	支路电流	U_i-U_j	Z_{ij}
92	$U_1=$	0.6779	1.0000	0.3221	0.0000	$I_{1F}=$	7.0152	0.6779	0.0966
93	$U_2=$	0.3918	1.0000	0.6082	0.0000	$I_{2F}=$	3.9198	0.3918	0.1000
94	$U_3=$	0.5227	1.0000	0.4773	0.0000	$I_{42}=$	0.9653	0.2027	0.2100
95	$U_4=$	0.5946	1.0000	0.4054	0.0000	$I_{52}=$	0.9653	0.2027	0.2100
96	$U_5=$	0.5946	1.0000	0.4054	0.0000	$I_{32}=$	1.9891	0.1309	0.0658
97	$U_6=$	0.6914	1.0000	0.3086	0.0000	$I_{13}=$	0.9772	0.1552	0.1588
98	$U_7=$	0.6914	1.0000	0.3086	0.0000	$I_{63}=$	0.5060	0.1686	0.3333
99	$U_8=$	0.3918	1.0000	0.6082	0.0000	$I_{73}=$	0.5060	0.1686	0.3333
100	$U_9=$	0.3918	1.0000	0.6082	0.0000	$I_{82}=$	0.0000	0.0000	0.1101
101	$U_F=$	0.0000	1.0000	1.0000	10.9350	$I_{98}=$	0.0000	0.0000	0.3333

在计算单相接地、两相接地等不对称故障时的电流、电压和各支路流过电流的方法和计算三相对称短路故障时方法一样,分别求出正序、负序和零序电流、电压,应用对称分量法求出故障电流和故障电压,读者可自行分析计算。

2.5 绘制故障点 F 的故障电流曲线

故障点 F 在线路 ①-② 变化时流经支路 ②- F

的各种故障电流的曲线可按上述方法求出故障点 F 在线路 ①-② 上变化时流经支路 ②- F 各种短路故障电流,如表 3 所示。应用 Excel 电子表格图表功能绘制各种故障电流随故障点移动而变化的曲线图^[10],如图 3 所示,电流曲线图直接、美观,为分析各种故障提供了方便。

表 3 故障点 F 在线路 ①-② 上移动时流经支路 ②- F 各种故障电流表
Tab.3 Fault current changes of branch ②- F as fault point F moving along line ①-②

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	三相短路故障			单相接地故障			两相短路故障			两相接地故障		
2	故障距离		I_{2F}	故障距离		I_{2F}	故障距离		I_{2F}	故障距离		I_{2F}
3	L_X/km	有名值(A)	标么值	L_X/km	有名值(A)	标么值	L_X/km	有名值(A)	标么值	L_X/km	有名值(A)	标么值
4	0	3774	7.52	0	3946	7.86	0	3269	6.51	0	3859	7.69
5	5	3307	6.59	5	3108	6.19	5	2864	5.70	5	3223	6.42
6	10	2935	5.85	10	2562	5.10	10	2542	5.06	10	2793	5.56
7	15	2632	5.24	15	2176	4.33	15	2279	4.54	15	2469	4.92
8	20	2378	4.74	20	1889	3.76	20	2059	4.10	20	2211	4.40
9	25	2160	4.30	25	1667	3.32	25	1870	3.73	25	1996	3.98
10	30	1968	3.92	30	1488	2.96	30	1704	3.39	30	1812	3.61
11	35	1794	3.57	35	1340	2.67	35	1553	3.09	35	1648	3.28
12	40	1631	3.25	40	1215	2.42	40	1413	2.81	40	1497	2.98
13	45	1470	2.93	45	1103	2.20	45	1273	2.54	45	1351	2.69
14	50	1299	2.59	50	998	1.99	50	1125	2.24	50	1197	2.38
15	55	1089	2.17	55	884	1.76	55	943	1.88	55	1013	2.02
16	59	847	1.69	59	751	1.50	59	734	1.46	59	804	1.60

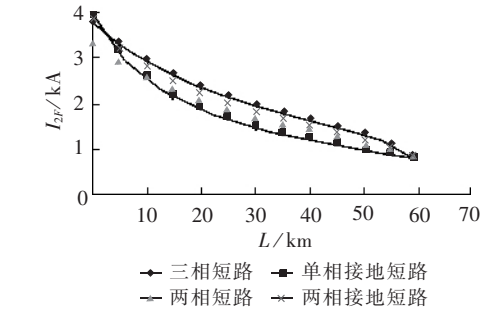


图 3 故障点 F 在线路 ①-② 上移动时流经支路 ②- F 各种故障电流曲线图

Fig.3 Fault current curves of branch ②- F as fault point F moving along line ①-②

3 结语

Excel 具有强大的计算、数据分析和图表显示等功能。在对电力系统(尤其对于中小型电力系统)故障计算分析时,运用 Excel 的数据自动填充、单元格数据引用、公式与函数计算、图表等功能,可获得准确、方便、直观效果。

参考文献:

[1] 周孔章. 电路原理[M]. 北京:高等教育出版社,1982.
[2] 邱光源. 电路[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2001.
[3] 吴锡龙. 电路分析导论[M]. 北京:高等教育出版社,1987.
[4] 邱光源. 网络理论分析[M]. 北京:科学出版社,1982.
[5] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京:水利电力出版社,1986.
[6] 陈亚民. 电力系统计算程序及其实现[M]. 北京:水利电力出版社,2002.
[7] 肖筱南,赵来军,党林立. 现代数值计算方法[M]. 北京:北京大学出版社,2004.
[8] 展望公司. Microsoft Excel 97 即学即会[M]. 北京:北京大学出版社,1997.
[9] 谢剑,赵刚. Excel 在建筑工程中的应用——快速计算工具实例[M]. 天津:天津大学出版社,2004.
[10] 苏德佳. Excel 电子表格在阻抗保护检验中的应用[J]. 福建电力与电工,2005,25(2):56-57.
SU De-jia. Application of excel spreadsheet to verity of impedance protection[J]. Fujian Power and Electrical Engineering, 2005,25(2):56-57.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

苏德佳(1969-),男,福建尤溪人,工程师,主要从事水电厂继电保护技术管理工作(E-mail:sdjj9@sina.com)。

Application of Excel in electric power fault calculation

SU De-jia

(Fujian Youxi Valley Hydroelectric Power Development Co.,Ltd.,Youxi 365100,China)

Abstract: Plenty of fault calculation and data analysis are necessary in the electric power planning, design and operation,which is difficult to be carried out manually. Commonly used methods,the node electrical potential law and the circuit current law,are discussed,which calculate fault parameters based on solutions of the node admittance equation and the node impedance equation. Excel is a widely-used office software with powerful functions of computation,data analysis and graphic processing. Its application in electric power fault calculation is illustrated with examples: establish system equivalent sequential networks and their node admittance matrices;convert them into impedance matrices using the matrix reverse function of Excel;solve the impedance equation;and calculate fault parameters. The fault calculation becomes precise, convenient and direct.

Key words: Excel spreadsheet; fault; node; network; matrix