

改进直流法在静态安全分析中的应用

袁智强, 陈宇晨, 刘涌, 侯志俭

(上海交通大学电力学院, 上海 200240)

摘要: 在电力系统静态安全分析中, 直流法由于具有简单、快速、便于实时计算等优点而得到广泛应用, 然而由于其计算精度较差使得计算效果不够令人满意。文中提出了一种改进的直流法来提高直流法的计算精度。通过 IEEE 的标准算例对该算法进行了验证, 结果表明所提出的方法是有效的。

关键词: 静态安全分析; 直流法; 改进直流法

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)07-0023-05

1 引言

建立电力市场是电力行业深化改革的发展趋势, 而联营交易模式和双边交易模式是最基本的电力市场交易模式。在电力市场中各种交易模式下电网均处于核心的重要地位, 提供转运业务是电力市场中电网的一项基本功能。然而由于电网输电容量的限制, 可能会使得一部分转运无法实现, 因此需要对各种交易进行校验, 这部分任务由系统运行中心来完成。系统运行中心的首要任务是保证系统的安全可靠运行, 在安全可靠检验通不过的情况下有权对交易计划提出异议, 如在造成网络拥挤或系统安全受到威胁时, 系统运行中心有权修改交易计划。对于区域电力市场, 当由于区域间联络线的稳定限额及网络安全等约束影响到区域间电力电量交换的传输水平时, 区域间的电力输送要受到限制, 在统一调度时需相应考虑区域内和区域间的网络约束。随着电网规模的不断扩大以及电力市场的不断放开, 交易的规模将不断扩大, 相应地对电网的静态安全分析的要求不断提高。因此, 在电力市场环境下, 研究电力系统静态安全分析有其现实意义。现有的直流法由于具有简单、快速和便于实时计算等优点而在静态安全分析中得到广泛应用, 但其计算精度较差。而交流潮流法虽然在精度上可以取得令人满意的效果, 但在执行时间上有所增加。本文利用从 EMS 输入的经状态估计后的电网运行数据对直流法进行了改进, 并建立了故障情况下的直流法模型。最后对 IEEE14 和 30 节点的系统做了数字仿真, 结果表明所提方法是简单有效的。

2 直流法的数学模型

2.1 正常情况下的常规直流法模型

电网的潮流方程为:

$$\begin{cases} P_i = P_{gi} - P_{di} - \sum_{j \in i} U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i = Q_{gi} - Q_{di} - \sum_{j \in i} U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: n 为电网中的节点总数; $j \in i$ 表示与节点 i 相邻接的节点 j , 且包括 $j = i$ 的情况; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, θ_i 、 θ_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压相角; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的互电导、互电纳; U_i 为节点 i 的电压幅值; P_{di} 、 Q_{di} 、 P_{gi} 、 Q_{gi} 分别为节点有功、无功负荷及发电机有功、无功出力。

常规的直流法对方程组 (1) 采用了下列简化条件:

$$\begin{cases} U_i \cong U_j \cong 1.0 \\ \cos \theta_{ij} \cong 1 \\ \sin \theta_{ij} \cong \theta_i - \theta_j \\ G_{ij} \ll B_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

采用了简化条件并忽略电网的无功功率后, 得到节点电压相角和有功注入的关系如下:

$$P_0 = [B_0]^{-1} P_D \quad (3)$$

式 (3) 即为正常情况下直流潮流法的数学模型, 式中不含平衡节点的相关各量, 下标 0 表示系统故障前结构未改变的量 (下同)。其中 $P_0 = P_{00} - P_{D0}$ 为 $(n-1)$ 维节点有功功率注入列向量; P_{D0} 为 $(n-1)$ 维节点电压相角列向量; B_0 为 $(n-1) \times (n-1)$ 阶稀疏矩阵, 其元素为: $B_{ij} = b_{ij}$, $B_{ii} = -\sum_{j \in i} b_{ij}$, b_{ij} 为连接节点 i 和 j 的线路或变压器的支路电纳。

2.2 改进的直流法模型

由于对电力系统进行实时的静态安全分析时,

各节点电压以及变压器抽头均可通过 EMS 由状态估计获得。因此在建立直流潮流模型时,可考虑利用这些值以提高计算精度。

此时由式(1)可推导出直流潮流模型如下:

$$P_0 = [B_0]_0 \tag{4}$$

式(4)中 B_0 为 $(nr-1) \times (nr-1)$ 阶稀疏矩阵,其元素为: $B_{ij} = b_{ij}$, $B_{ij} = -b_{ij}$ 。对于传输线路, $b_{ij} = U_i U_j b_{ij}$; 对于变压器支路, $b_{ij} = U_i U_j b_{ij} / t_{ij}$, t_{ij} 为节点 i 和 j 之间的变压器抽头。

支路潮流为 $P_{ij0} = -b_{ij}(i - j)$ 。

3 在 N-1 情况下的改进直流法潮流

在静态安全分析中,需要检验在线路或变压器出现故障时电网的运行情况,因此要进行故障校验。本文利用补偿法建立了改进的直流潮流法在线路或变压器发生 $N-1$ 故障时的数学模型。

当支路 km 开断后,有

$$P_0 = [B] = [B_0 + B](0 + km),$$

$$\text{即 } 0 + km = [B]^{-1} P_0 = [B_0 + B]^{-1} P_0 \tag{5}$$

利用补偿法,可将上式表示为:

$$0 + km = [B_0]^{-1} (P_0 + P) \tag{6}$$

式中: $P = -b_{km}(k - m)(M_k - M_m)$ 。

而 $M_k = [0, \dots, +1, \dots, 0]$, 其中第 k 项为 1, 其余为 0; $M_m = [0, \dots, +1, \dots, 0]$, 其中第 m 项为 1, 其余为 0。 km 表示支路 km 开断后节点电压相角的改变量。

$$\text{则 } 0 + km = 0 - b_{km}(k - m)[B_0]^{-1} \cdot (M_k - M_m), \tag{7}$$

为求最终解,写出式(7)的第 k 和 m 个方程式:

$$\begin{cases} k = k_0 - b_{km}(k - m)(Z_{kk} - Z_{km}) \\ m = m_0 - b_{km}(k - m)(Z_{mk} - Z_{mm}) \end{cases} \tag{8}$$

式(8)中, Z_{kk} 、 Z_{mk} 、 Z_{km} 、 Z_{mm} 分别为向量 $[B_0]^{-1} M_k$ 与 $[B_0]^{-1} M_m$ 的相应各行元素; k 和 m 分别表示支路 km 开断后节点 k 和节点 m 的电压相角。经过化简运算,式(7)成为下式:

$$= 0 - \left[\frac{1}{b_{km}} + Z_{kk} + Z_{mm} - Z_{km} - Z_{mk} \right]^{-1} \cdot (k_0 - m_0)(Z_k - Z_m) \tag{9}$$

$$\text{即 } km = - \left[\frac{1}{b_{km}} + Z_{kk} + Z_{mm} - Z_{km} - Z_{mk} \right]^{-1} \cdot (k_0 - m_0)(Z_k - Z_m)$$

算出 km 后,代入 $P_{ij} = -b_{ij}(i - j)$, 最后算出各支路 $P_{ij} = P_{ij0} + P_{ij}$; 也可算出 km 后,直接计算 $P_{ij} = -b_{ij}(i - j)$ 。

4 算例分析

本文对 IEEE-14 和 IEEE-30 节点的标准测试系统进行了仿真计算,测试参数见文献[1]。直流法正常潮流用三种方法进行了仿真计算,其中方法一是考虑了节点实际电压、变压器实际抽头和线路损耗的方案,方法二是考虑了节点实际电压、变压器实际抽头的方案,方法三采用常规直流法计算。方法一中线路的损耗当负荷考虑并挂在送出节点侧,线路潮流为用直流法计算出线路潮流后再加上线损所得的值。计算结果详见表 1 和表 2。

从计算结果可见,当利用 EMS 中状态估计所得的节点电压和变压器抽头时,直流潮流法计算所得的支路功率结果精度普遍高于常规潮流,此外,若能利用测得的线路损耗,则所得精度会更高。

表 1 IEEE-14 节点网络直流法正常潮流结果表

Tab. 1 Results of power flow with different methods under normal condition on IEEE14 system

始末节点	线路潮流/p.u.				误差/%		
	实际潮流	方法一	方法二	方法三	方法一	方法二	方法三
Bus4, Bus7	0.2806	0.2854	0.284	0.2901	1.71	1.21	3.39
Bus4, Bus9	0.1607	0.1635	0.1628	0.1665	1.74	1.31	3.61
Bus5, Bus6	0.4442	0.4367	0.4332	0.4234	- 1.69	- 2.48	- 4.68
Bus1, Bus2	1.576	1.5828	1.4887	1.4852	0.43	- 5.54	- 5.76
Bus1, Bus5	0.7589	0.7522	0.7113	0.7148	- 0.88	- 6.27	- 5.81
Bus2, Bus3	0.7322	0.7255	0.7018	0.7003	- 0.92	- 4.15	- 4.36
Bus2, Bus4	0.5632	0.5728	0.555	0.554	1.70	- 1.46	- 1.63
Bus2, Bus5	0.4172	0.421	0.4119	0.411	0.91	- 1.27	- 1.49
Bus4, Bus3	0.2346	0.2414	0.2382	0.2397	2.90	1.53	2.17
Bus5, Bus4	0.6148	0.6195	0.61	0.6223	0.76	- 0.78	1.22
Bus6, Bus11	0.0756	0.0708	0.0706	0.0647	- 6.35	- 6.61	- 14.42

续表 1

始末节点	线路潮流/p.u.				误差/ %		
	实际潮流	方法一	方法二	方法三	方法一	方法二	方法三
Bus6, Bus12	0.078	0.0775	0.0767	0.0758	- 0.64	- 1.67	- 2.82
Bus6, Bus13	0.1807	0.1783	0.1759	0.1729	- 1.33	- 2.66	- 4.32
Bus7, Bus8	0	0	0	0	/	/	/
Bus7, Bus9	0.2806	0.2854	0.284	0.2901	1.71	1.21	3.39
Bus9, Bus10	0.0552	0.06	0.0594	0.0653	8.70	7.61	18.30
Bus9, Bus14	0.0961	0.0989	0.0973	0.1013	2.91	1.25	5.41
Bus11, Bus10	0.035	0.0302	0.0306	0.0247	- 13.71	- 12.57	- 29.43
Bus12, Bus13	0.0172	0.0168	0.0167	0.0158	- 2.33	- 2.91	- 8.14
Bus13, Bus14	0.0556	0.0528	0.0527	0.0487	- 5.04	- 5.22	- 12.41

表 2 IEEE 30 节点网络直流法正常潮流结果表

Tab. 2 Results of power flow with different methods under normal condition on IEEE30 system

始末节点	线路潮流/p.u.				误差/ %		
	实际潮流	方法一	方法二	方法三	方法一	方法二	方法三
6, 9	0.1264	0.1285	0.1257	0.1275	1.66	- 0.55	0.87
6, 10	0.1125	0.1137	0.1121	0.1125	1.07	- 0.36	0.00
4, 12	0.2533	0.2502	0.2456	0.238	- 1.22	- 3.04	- 6.04
28, 27	0.1664	0.1663	0.1635	0.1691	- 0.06	- 1.74	1.62
1, 2	0.5853	0.588	0.5512	0.5493	0.46	- 5.83	- 6.15
1, 3	0.4023	0.3995	0.3828	0.3847	- 0.70	- 4.85	- 4.37
2, 4	0.3145	0.3153	0.3074	0.3071	0.25	- 2.26	- 2.35
3, 4	0.3714	0.3686	0.3588	0.3607	- 0.75	- 3.39	- 2.88
2, 5	0.4541	0.4521	0.4413	0.4396	- 0.44	- 2.82	- 3.19
2, 6	0.3935	0.3975	0.3855	0.3856	1.02	- 2.03	- 2.01
4, 6	0.3492	0.3503	0.3446	0.3538	0.32	- 1.32	1.32
5, 7	0.0028	0.0008	- 0.0007	- 0.0024	- 71.43	- 125.00	- 185.71
6, 7	0.2268	0.2287	0.2287	0.2304	0.84	0.84	1.59
6, 8	0.1194	0.1193	0.1186	0.1196	- 0.08	- 0.67	0.17
11, 9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00	0.00
9, 10	0.3264	0.3285	0.3257	0.3275	0.64	- 0.21	0.34
13, 12	0.2	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00	0.00
12, 14	0.08	0.0801	0.0791	0.078	0.13	- 1.13	- 2.50
12, 15	0.1853	0.184	0.181	0.1775	- 0.70	- 2.32	- 4.21
12, 16	0.076	0.0741	0.0735	0.0705	- 2.50	- 3.29	- 7.24
14, 15	0.0172	0.0173	0.0171	0.016	0.58	- 0.58	- 6.98
16, 17	0.0404	0.0385	0.0385	0.0355	- 4.70	- 4.70	- 12.13
15, 18	0.0615	0.061	0.0607	0.0593	- 0.81	- 1.30	- 3.58
18, 19	0.0291	0.0286	0.0287	0.0273	- 1.72	- 1.37	- 6.19
20, 19	0.0661	0.0666	0.0663	0.0677	0.76	0.30	2.42
10, 20	0.0889	0.0894	0.0883	0.0897	0.56	- 0.67	0.90
10, 17	0.0499	0.0518	0.0515	0.0545	3.81	3.21	9.22
10, 21	0.1628	0.1634	0.1615	0.1601	0.37	- 0.80	- 1.66
10, 22	0.0794	0.0796	0.0786	0.0776	0.25	- 1.01	- 2.27
22, 21	0.0134	0.0128	0.0135	0.0149	- 4.48	0.75	11.19
15, 23	0.0566	0.0559	0.0553	0.0522	- 1.24	- 2.30	- 7.77
22, 24	0.0654	0.0662	0.0651	0.0627	1.22	- 0.46	- 4.13
23, 24	0.0243	0.0235	0.0233	0.0202	- 3.29	- 4.12	- 16.87
24, 25	0.0021	0.0021	0.0015	- 0.0041	0.00	- 28.57	- 295.24
25, 26	0.0354	0.0355	0.035	0.035	0.28	- 1.13	- 1.13
27, 25	0.0335	0.0335	0.0335	0.0391	0.00	0.00	16.72
27, 29	0.0619	0.0617	0.0606	0.0606	- 0.32	- 2.10	- 2.10
27, 30	0.0709	0.0711	0.0694	0.0694	0.28	- 2.12	- 2.12
29, 30	0.037	0.0369	0.0366	0.0366	- 0.27	- 1.08	- 1.08
8, 28	0.0193	0.0192	0.0186	0.0196	- 0.52	- 3.63	1.55
6, 28	0.1475	0.1476	0.145	0.1494	0.07	- 1.69	1.29

表 3 IEEE 14 节点网络支路 1~2 开断潮流结果表

Tab. 3 Results of power flow with different methods under line 1-2 broken on IEEE 14 system

始末节点	线路潮流/p.u.			误差/%	
	实际潮流	方法一	方法二	方法一	方法二
Bus4, Bus7	0.2441	0.252	0.2541	3.24	4.10
Bus4, Bus9	0.1393	0.1443	0.1455	3.59	4.45
Bus5, Bus6	0.5036	0.4893	0.4859	- 2.84	- 3.51
Bus1, Bus2	0	0	0	/	/
Bus1, Bus5	2.624	2.2477	2.2442	- 14.34	- 14.47
Bus2, Bus3	0.4796	0.4856	0.4815	1.25	0.40
Bus2, Bus4	0.0173	0.0367	0.0384	112.14	121.97
Bus2, Bus5	- 0.3168	- 0.2985	- 0.2925	- 5.78	- 7.67
Bus4, Bus3	0.4897	0.4812	0.4854	- 1.74	- 0.88
Bus5, Bus4	1.3693	1.3429	1.3487	- 1.93	- 1.50
Bus6, Bus11	0.1115	0.103	0.1007	- 7.62	- 9.69
Bus6, Bus12	0.0828	0.0819	0.0816	- 1.09	- 1.45
Bus6, Bus13	0.1994	0.1945	0.1936	- 2.46	- 2.91
Bus7, Bus8	0	0	0	/	/
Bus7, Bus9	0.2441	0.252	0.2541	3.24	4.10
Bus9, Bus10	0.0202	0.0279	0.0301	38.12	49.01
Bus9, Bus14	0.0732	0.0784	0.0795	7.10	8.61
Bus11, Bus10	0.0703	0.0623	0.0601	- 11.38	- 14.51
Bus12, Bus13	0.022	0.0211	0.0209	- 4.09	- 5.00
Bus13, Bus14	0.0786	0.0733	0.0722	- 6.74	- 8.14

表 4 IEEE 14 节点网络支路 5~6 开断潮流结果表

Tab. 4 Results of power flow with different methods under line 5-6 broken on IEEE 14 system

始末节点	线路潮流/p.u.			误差/%	
	实际潮流	方法一	方法二	方法一	方法二
Bus4, Bus7	0.5765	0.556	0.5497	- 3.56	- 4.65
Bus4, Bus9	0.3306	0.3185	0.315	- 3.66	- 4.72
Bus5, Bus6	0	0	0	/	/
Bus1, Bus2	1.6229	1.6027	1.6013	- 1.24	- 1.33
Bus1, Bus5	0.7459	0.7322	0.7337	- 1.84	- 1.64
Bus2, Bus3	0.7587	0.7544	0.7537	- 0.57	- 0.66
Bus2, Bus4	0.6191	0.6104	0.608	- 1.41	- 1.79
Bus2, Bus5	0.379	0.3747	0.3762	- 1.13	- 0.74
Bus4, Bus3	0.2091	0.2125	0.2132	1.63	1.96
Bus5, Bus4	1.0106	0.9787	0.972	- 3.16	- 3.82
Bus6, Bus11	- 0.1969	- 0.1875	- 0.1793	- 4.77	- 8.94
Bus6, Bus12	0.0454	0.0403	0.0405	- 11.23	- 10.79
Bus6, Bus13	0.0415	0.0483	0.0497	16.39	19.76
Bus7, Bus8	0	0	0	/	/
Bus7, Bus9	0.5765	0.556	0.5497	- 3.56	- 4.65
Bus9, Bus10	0.3405	0.3184	0.3102	- 6.49	- 8.90
Bus9, Bus14	0.2767	0.2662	0.2645	- 3.79	- 4.41
Bus11, Bus10	- 0.2419	- 0.2281	- 0.22	- 5.70	- 9.05
Bus12, Bus13	- 0.0151	- 0.0205	- 0.0202	35.76	33.77
Bus13, Bus14	- 0.1148	- 0.1144	- 0.1128	- 0.35	- 1.74

表 5 IEEE 30 节点网络支路 1~2 开断潮流结果表

Tab. 5 Results of power flow with different methods under line 1-2 broken on IEEE 30 system

始末节点	线路潮流/p.u.			误差/%	
	实际潮流	方法一	方法二	方法一	方法二
6, 9	0.1159	0.1169	0.1175	0.86	1.38
6, 10	0.1064	0.107	0.1074	0.56	0.94
4, 12	0.2738	0.2717	0.2708	- 0.77	- 1.10
28, 27	0.163	0.163	0.163	0.00	0.00
1, 2	0	0	0	/	/
1, 3	1.0206	0.9535	0.9516	- 6.57	- 6.76
2, 4	0.0365	0.0476	0.0504	30.41	38.08
3, 4	0.9539	0.9226	0.9207	- 3.28	- 3.48
2, 5	0.3617	0.3679	0.3663	1.71	1.27
2, 6	0.1848	0.1955	0.1961	5.79	6.11
4, 6	0.6268	0.615	0.6169	- 1.88	- 1.58
5, 7	- 0.0865	- 0.0834	- 0.085	- 3.58	- 1.73
6, 7	0.3179	0.313	0.3146	- 1.54	- 1.04
6, 8	0.1188	0.1188	0.1188	0.00	0.00
11, 9	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00
9, 10	0.3159	0.3169	0.3175	0.32	0.51
13, 12	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00
12, 14	0.0821	0.0822	0.0821	0.12	0.00
12, 15	0.1941	0.193	0.1927	- 0.57	- 0.72
12, 16	0.0856	0.0845	0.0839	- 1.29	- 1.99
14, 15	0.0193	0.0194	0.0193	0.52	0.00
16, 17	0.0499	0.0489	0.0483	- 2.00	- 3.21
15, 18	0.0666	0.0662	0.066	- 0.60	- 0.90
18, 19	0.0342	0.0338	0.0336	- 1.17	- 1.75
20, 19	0.0611	0.0614	0.0616	0.49	0.82
10, 20	0.0838	0.0842	0.0845	0.48	0.84
10, 17	0.0404	0.0414	0.042	2.48	3.96
10, 21	0.1615	0.1616	0.1617	0.06	0.12
10, 22	0.0785	0.0786	0.0787	0.13	0.25
22, 21	0.0147	0.0145	0.0144	- 1.36	- 2.04
15, 23	0.0622	0.0619	0.0617	- 0.48	- 0.80
22, 24	0.0633	0.0635	0.0637	0.32	0.63
23, 24	0.0298	0.0295	0.0293	- 1.01	- 1.68
24, 25	0.0055	0.0055	0.0054	0.00	- 1.82
25, 26	0.0354	0.0354	0.0354	0.00	0.00
27, 25	0.0301	0.0301	0.0302	0.00	0.33
27, 29	0.0619	0.0619	0.0619	0.00	0.00
27, 30	0.0709	0.0709	0.0709	0.00	0.00
29, 30	0.037	0.037	0.037	0.00	0.00
8, 28	0.0186	0.0186	0.0186	0.00	0.00
6, 28	0.1447	0.1448	0.1449	0.07	0.14

表6 IEEE-30 节点网络支路4~12开断潮流结果表

Tab.6 Results of power flow with different methods under line 4~12 broken on IEEE30 system

始末节点	线路潮流/p.u.			误差/%	
	实际潮流	方法一	方法二	方法一	方法二
6, 9	0.2595	0.2539	0.249	-2.16	-4.05
6, 10	0.189	0.1858	0.1826	-1.69	-3.39
4, 12	0	0	0	/	/
28, 27	0.212	0.2112	0.2118	-0.38	-0.09
1, 2	0.6011	0.6001	0.5992	-0.17	-0.32
1, 3	0.3907	0.3874	0.3884	-0.84	-0.59
2, 4	0.2907	0.2908	0.2921	0.03	0.48
3, 4	0.3604	0.3565	0.3575	-1.08	-0.80
2, 5	0.4658	0.4658	0.4653	0.00	-0.11
2, 6	0.4212	0.4204	0.4187	-0.19	-0.59
4, 6	0.5689	0.5562	0.5508	-2.23	-3.18
5, 7	0.0141	0.0145	0.014	2.84	-0.71
6, 7	0.2153	0.2151	0.2156	-0.09	0.14
6, 8	0.1283	0.1283	0.1284	0.00	0.08
11, 9	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00
9, 10	0.4595	0.4539	0.449	-1.22	-2.29
13, 12	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00
12, 14	0.0527	0.0506	0.0511	-3.98	-3.04
12, 15	0.0763	0.082	0.0841	7.47	10.22
12, 16	-0.041	-0.0368	-0.0319	-10.24	-22.20
14, 15	-0.0097	-0.0122	-0.0117	25.77	20.62
16, 17	-0.0763	-0.0724	-0.0674	-5.11	-11.66
15, 18	-0.0025	-0.0014	0.0004	-44.00	-116.00
18, 19	-0.0345	-0.0338	-0.032	-2.03	-7.25
20, 19	0.1302	0.129	0.1273	-0.92	-2.23
10, 20	0.1544	0.1518	0.1501	-1.68	-2.78
10, 17	0.1677	0.1627	0.1577	-2.98	-5.96
10, 21	0.1787	0.1779	0.177	-0.45	-0.95
10, 22	0.0898	0.0893	0.0887	-0.56	-1.22
22, 21	-0.0023	-0.0017	-0.0008	-26.09	-65.22
15, 23	-0.0137	-0.0132	-0.0124	-3.65	-9.49
22, 24	0.0914	0.0905	0.089	-0.98	-2.63
23, 24	-0.0458	-0.0456	-0.0447	-0.44	-2.40
24, 25	-0.0427	-0.0427	-0.0433	0.00	1.41
25, 26	0.0354	0.0354	0.0354	0.00	0.00
27, 25	0.0791	0.0783	0.0789	-1.01	-0.25
27, 29	0.0619	0.0619	0.0619	0.00	0.00
27, 30	0.0709	0.0709	0.0709	0.00	0.00
29, 30	0.037	0.037	0.037	0.00	0.00
8, 28	0.0281	0.0281	0.0283	0.00	0.71
6, 28	0.1845	0.1834	0.1839	-0.60	-0.33

此外,对两系统主要线路的开断做了模拟计算,其中方案一利用了节点实际电压、变压器实际抽头,方案二没有利用节点电压和变压器抽头。由于篇幅所限,每个系统仅列出两条主要线路开断的仿真结果,详见表3~6。从计算结果可以看出,当利用节点实际电压和变压器实际抽头时,由改进直流潮流法

计算所得的支路功率结果精度普遍高于常规直流法。采用改进直流潮流法时,有少量支路的精度低于采用常规直流法,这些线路主要分布在故障线路附近,它是由于此时线路功率、阻抗和电压之间有较强的非线性关系而引起的,这种情况下两者精度相差较小,对静态安全分析的结果影响很小,因而关系不大。

从所计算的各种结果可以看出,无论是对IEEE-14测试系统的计算,还是对IEEE-30测试系统的计算,由于所提出的改进直流法利用了节点实际电压和变压器实际抽头等数据,使得计算精度高出常规直流法较多,具体数值见各表。此外,从表中结果也可看出,一些线路的误差无论采用哪种直流法均很大,如表2中的线路5~7,24~25,表3中的线路2~4,表5中的线路2~4,表6中的线路15~18等,这是由于直流法本身的缺陷,即将非线性的关系近似处理为线性关系造成的,但应该注意到,这些线路均为轻载线路,对静态安全分析的结果没有影响,因而可不考虑这些线路的误差。应该指出,由于EMS中状态估计所得到的节点电压等数据也是有误差的,因而它会对计算结果产生影响,深入分析这些影响是本文下一步的研究工作。

5 结语

在实时进行电力系统静态安全分析时,由于要求计算速度快,目前直流法还是得到了普遍运用,然而常规直流潮流法的计算精度较差。本文根据实时的特点,利用EMS中状态估计所得的节点实际电压和变压器实际抽头对常规直流法进行了改进并推导了相应的公式。通过仿真计算表明所提出的方法是有效的。

参考文献:

- [1] 吴际舜,侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.
- [2] 于尔铿,韩放,谢开,等. 电力市场[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [3] 吴际舜. 电力系统稳态分析的计算机方法[M]. 上海:上海交通大学出版社,1992.
- [4] 赵遵廉,辛耀中,郭国川. 电力市场运营系统[M]. 北京:中国电力出版社,2001.

收稿日期: 2002-10-09; 修回日期: 2002-12-28

(下转第80页)

为基准。在定值单中,CT变比作为单独的一栏,有24路CT变比定值,用户根据自己的需要整定。

(2) 不同规格CT混用的说明

有的变电站,用户不能提供同规格的CT,也即5A和1A规格的CT混用,对于这种情况,WMH800母线保护采用自动把1A规格转换为5A规格的方法,用户折算CT变比时,要把1A规格的元件的CT变比乘以5,计算定值也按5A规格。

10 结束语

以上是本文作者总结多年母线保护的供货和运行经验的心得,为使用母线保护的用户提供一些可以依据的原则,一定存在不足之处,希望电力系统同行多多提出宝贵意见。

参考文献:

- [1] 王春生,等. 母线保护[M]. 中国电力出版社,1997.
- [2] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等. 电力系统继电保护与安全自动装置的整定计算[M]. 水利电力出版社,1993.

收稿日期: 2002-11-12; 修回日期: 2003-03-05

作者简介:

周晓龙(1976-),男,助理工程师,工学学士,从事微机母线保护的研发和市场技术支持;

程天保(1971-),男,工程师,工学学士,从事微机母线保护的研发和市场技术支持;

刘廷卫(1969-),男,工程师,从事继电保护运行管理工作;

王九刚(1969-),男,工程师,从事继电保护电气设计工作。

Setting principle of WMH800 microcomputer-based busbar protective relay

ZHOU Xiaolong¹, CHENG Tianbao¹, LIU Tingwei², WANG Jiurong³

(1. Xi Electric Corporation, Xuchang 461000, China; 2. Liaoyang Petrochemical Corporation, Liaoyang 111003, China;

3. Gansu Electric Power Design & Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Numerical busbar protective relay based on current differential principle with ratio restraining characteristic is used widely in the electric power system. Its setting method can't keep to the old principle indiscriminately. This paper introduces the setting principle of WMH800. Especially it analyzes the theory that how to calculate the differential setting value and the voltage interlock setting value and etc. Some reference principles for the setting calculation of numerical busbar protection is provided.

Key words: setting principle; reliability coefficient; sensitivity; busbar protection

(上接第27页)

作者简介:

袁智强(1969-),男,工程师,博士研究生,从事电力市场、电力系统安全分析方向的研究;

陈宇晨(1957-),男,副教授,博士研究生,从事电力市

场、电力系统安全分析方向的研究;

刘涌(1976-),男,博士研究生,从事电力市场、电力系统安全分析方向的研究;

侯志俭(1942-),男,博士生导师,教授,研究领域为电力市场、电力系统分析、配电网重构等。

Application of the improved direct current load flow algorithm on static security analysis

YUAN Zhi-qiang, CHEN Yu-chen, LIU Yong, HOU Zhi-jian

(Electric Power School of Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The direct current load flow model is broadly applied in the static security analysis in power system because it is simple and easy to calculate rapidly. Unfortunately, it is not so satisfied because of its low precision. One kind of improved direct current load flow model is put forward to improve its precision in the paper. The proposed approach was tested on the standard IEEE14-bus and IEEE30-bus system. The results of simulation show that the method is effective.

Key words: static security analysis; direct current load flow model; improved direct current load flow model