

计及发电机励磁调差系数的潮流计算方法分析

智 勇¹, 拜润卿¹, 梁福波¹, 梁 琛¹, 祁志远², 肖仕武²

(1. 甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃兰州 730050; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

Analysis on Power Flow Calculation by Considering the Excitation Adjustment Coefficient of Generator

ZHI Yong¹, BAI Runqing¹, LIANG Fubo¹, LIANG Chen¹, QI Zhiyuan², XIAO Shiwu²

(1. Gansu Province E&P Research Institute, Lanzhou 730050, China;

2. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘 要: 研究了发电机励磁调差系数与无功功率的关系, 以及计及发电机励磁调差系数的潮流计算模型。该模型摒弃了传统潮流中将发电机节点设为 PV 节点的假设, 而将发电机节点的电压看成随无功功率而变化的变量。以 IEEE14、IEEE30、IEEE118 节点和某省实际电网等不同规模的电力系统为算例, 并与传统潮流对比, 结果表明该算法不仅对小规模电力系统具有很好的收敛性, 对大规模电力系统也具有较好的收敛性。本文方法可使潮流计算结果更加准确, 无功功率在发电机之间的分配更加合理, 并且在维持电压稳定、降低系统网损方面具有优越性。

关键词: 电力系统; 潮流计算; 调差系数; 对比

Abstract: On the basis of studying the relationship between the excitation adjustment coefficient and reactive power of generator, a new power flow calculation model by considering the adjustment coefficient of generator is presented in this paper. The assumption of PV node in traditional power flow calculation is abandoned in the model, and the nodal voltages for generators are seen as variables that vary with reactive power. The power system with IEEE14, 30 and 118 nodes and one province power grid are taken as test cases, the results show that the new model has better convergence for both small-scale power system and large scale power system than that of traditional calculation algorithm. In addition, the results of power flow calculation are more accurate, the distribution of the reactive power between generators is more reasonable, and it has advantage on maintaining the voltage stability and lowering system loss.

Keywords: power system; power flow calculation; adjustment coefficient; comparison

0 引 言

潮流计算是电力系统中最基本最重要的计算之

一。自 20 世纪 50 年代中期利用电子计算机进行潮流计算以来, 出现了多种算法^[1-4]。这些算法把电力网络的节点划分为平衡节点、PV 节点、PQ 节点, 每个节点有 4 个运行变量, 在给定其中两个的情况下就可以求解潮流方程。一般将发电机节点定为 PV 节点, 但是在实际中发电机节点电压随发电机发出的无功功率而变化, 为此国内外学者提出了大量的解决方案。文献 [5] 提出了避免设置平衡节点的方法; 文献 [6] 提出了传统潮流方程和动态元件状态方程联立求解的方法; 文献 [7] 提出了计及机组静态调节特性的电力系统潮流模型; 文献 [8] 给出了计及发电机励磁静态特性作用的电力系统潮流计算模型, 但缺乏翔实的解法和对实际系统的检验。本文将在文献 [8] 的基础上进一步研究计及发电机励磁调差系数的潮流计算模型及其算法, 以 IEEE14、IEEE30、IEEE118 节点和某省电网实际系统等不同规模的电网为算例, 并与传统潮流计算方法对比, 分析该方法的可行性、合理性和优越性。

1 计及调差系数的潮流计算模型

传统潮流算法把节点分为平衡节点、PQ 节点和 PV 节点 3 类。其中极坐标的潮流方程为

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

在传统潮流算法中没有考虑发电机输出无功功率与机端电压之间的关系, 但是实际上发电机的无功输出与发电机的无功功率静态特性有密切的关

系,如图1所示。

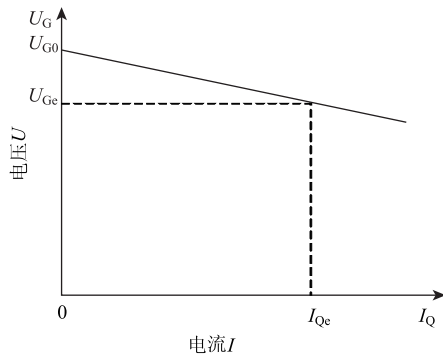


图1 发电机的无功功率-电压静态特性

由图1可得发电机输出的无功功率为

$$Q_{Gi} = U_{Gi} I_{Qi} = \frac{U_{G0i} U_{Gi} - U_{Gi}^2}{R_i} \quad (3)$$

式中: Q_{Gi} 为发电机发出的无功功率; U_{G0i} 为发电机的空载电压; U_{Gi} 为发电机负载时端电压; R_i 为发电机调差系数。

因此可以根据以上发电机无功功率与机端电压之间的关系建立计及发电机调差系数的潮流计算模型。对于 n 个节点的系统, 设 $1 \sim m$ 为负荷节点, 第 $(m+1) \sim (n-1)$ 为发电机节点, 第 n 个为平衡节点, 则计及调差系数的潮流方程为

$$\Delta P_i = P_{Li0} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (4)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Li0} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$\Delta Q_i = \frac{1}{R_{Gi}} (U_{G0i} U_i - U_i^2) -$$

$$U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0, \quad i = m+1, m+2, \dots, n \quad (6)$$

从潮流方程可以看出所有节点的电压幅值为未知量, 平衡节点的相角为参考量, 共有 $2n-1$ 个方程, 比传统的极坐标牛顿法多了 m 个方程, 故该方法摒弃了传统的 PV 节点。

2 计及调差系数潮流方程的求解

2.1 修正方程

仿照传统方法, 本方法可以采用极坐标的 N-R 法迭代求解, 其修正方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} \quad (7)$$

则对应于潮流方程(4)、(5)、(6)的各雅可比分块元素为

$$H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} = \begin{cases} U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (i \neq j) \\ -U_i \sum_{j=1, j \neq i}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (i = j) \end{cases}$$

$$N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} U_j = \begin{cases} U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & (i \neq j) \\ U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + U_i^2 G_{ii} & (i = j) \end{cases}$$

$$J_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} = \begin{cases} -U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & (i \neq j) \\ U_i \sum_{j=1, j \neq i}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & (i = j) \end{cases}$$

当 i 为发电机节点时,

$$L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} U_j = \begin{cases} U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (i \neq j) \\ U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - B_{ii} U_i^2 - (U_{G0i} U_i - 2U_i^2)/R_{Gi} & (i = j) \end{cases}$$

当 i 不是发电机节点时,

$$L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} U_j = \begin{cases} U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (i \neq j) \\ U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - B_{ii} U_i^2 & (i = j) \end{cases}$$

2.2 潮流计算流程图

应用计算机编程实现计及发电机调差系数的潮流计算算法, 具体的程序流程如图2所示。

3 算例和比较

3.1 小规模电力系统

IEEE14、IEEE30 节点和某省电网 22 节点实际系统为小规模电力系统, 其中 IEEE14 节点系统, 1、2、3、6、7、8 节点为发电机节点, 取调差系数均为 0.05; 某省电网 22 节点系统, 节点 1、5、8、20、21 为发电机节点, 取调差系数为 0.02; IEEE30 节点系统, 1、2、5、8、11、13 为发电机节点, 取调差系数为 0.05。取收敛精度为 $\epsilon <$

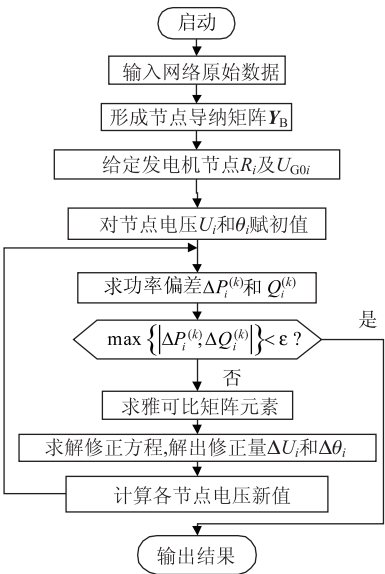


图 2 潮流计算流程图

10^{-5} , IEEE14 节点迭代过程结果如表 1 所示; IEEE14 节点、某省电网 22 节点系统、IEEE30 节点系统传统法和计及发电机调差系数法潮流计算结果对比情况分别如表 2、表 3、表 4 所示。

表 1 IEEE14 节点迭代过程 p. u.				
节点	每次迭代电压变化			
	1	2	3	4
1	1	1.068 5	1.057 8	1.057 7
2	1	1.053 9	1.042 7	1.042 6
3	1	1.043 2	1.035 7	1.035 6
4	1	1.031 5	1.017 9	1.017 7
5	1	1.031 3	1.016 9	1.016 7
6	1	1.057 1	1.050 0	1.049 9
7	1	1.053 8	1.042 7	1.042 5
8	1	1.052 9	1.048 4	1.048 4
9	1	1.053 3	1.041 4	1.041 2
10	1	1.046 2	1.035 3	1.035 2
11	1	1.048 0	1.039 0	1.038 9
12	1	1.042 5	1.035 4	1.035 3
13	1	1.034 9	1.027 4	1.027 3
14	1	1.012 2	1.002 3	1.002 1

由表 2、表 3、表 4 可得

① 与传统方法相比,该方法避免了人为给定发电机节点电压的刚性条件。传统方法发电机节点的电压都是给定的,而计及发电机调差系数潮流方法的发电机节点电压随发电机无功的出力而变化,更加符合实际。如表 2 的节点 2,传统法节点电压

1.05 保持不变,而本文方法电压变为 1.042 6。

表 2 IEEE14 节点系统两种潮流计算方法对比 p. u.

节点	传统牛顿法		计及调差系数法	
	节点电压	无功功率	节点电压	无功功率
1	1.050 0	-0.478 9	1.057 7	-0.162 8
2	1.050 0	0.427 5	1.042 6	0.154 9
3	1.050 0	0.388 9	1.035 6	0.298 6
4	1.023 3	0.039 0	1.017 7	0.039 0
5	1.020 4	-0.016 0	1.016 7	-0.016 0
6	1.050 0	-0.024 0	1.049 9	0.002 1
7	1.045 8	0.000 0	1.042 5	0.000 0
8	1.050 0	0.025 0	1.048 4	0.034 5
9	1.044 2	-0.166 0	1.041 2	-0.166 0
10	1.037 7	-0.058 0	1.035 2	-0.058 0
11	1.040 2	-0.018 0	1.038 9	-0.018 0
12	1.035 6	-0.016 0	1.035 3	-0.016 0
13	1.027 8	-0.058 0	1.027 3	-0.058 0
14	1.004 1	-0.050 0	1.002 1	-0.050 0

表 3 某省电网两种潮流计算方法对比 p. u.

节点	传统牛顿法		计及调差系数法	
	节点电压	无功功率	节点电压	无功功率
1	1.050 0	2.503 1	1.027 0	1.183 1
2	1.002 8	13.330 0	1.021 3	14.330 0
3	1.001 5	-10.850 0	1.019 9	-10.850 0
4	0.998 2	9.000 0	1.054 8	9.000 0
5	1.000 0	-1.238 0	1.056 9	-0.367 2
6	1.008 4	1.500 0	1.026 4	1.500 0
7	1.010 7	14.042 5	1.025 3	14.042 5
8	1.040 0	3.153 4	1.041 3	0.454 0
9	1.005 6	1.500 0	1.022 9	1.500 0
10	1.021 3	0.000 0	1.039 0	0.000 0
11	1.033 0	2.600 0	1.050 6	2.600 0
12	1.013 8	0.000 0	1.025 0	0.000 0
13	1.009 1	1.500 0	1.020 1	1.500 0
14	1.037 4	0.000 0	1.019 0	0.000 0
15	1.002 9	7.120 0	1.022 9	7.120 0
16	0.999 9	-2.049 0	1.020 9	-2.049 0
17	1.006 9	-0.284 0	1.029 2	-0.284 0
18	1.009 8	0.000 0	1.032 1	0.000 0
19	0.999 8	-3.511 9	1.020 5	-3.511 9
20	1.000 0	1.790 2	1.020 7	1.495 0
21	1.000 0	1.068 2	1.021 1	1.477 8
22	1.013 9	1.372 5	1.025 1	1.372 5

表 4 IEEE30 节点系统两种潮流计算方法对比 p. u.

节点	传统牛顿法		计及调差系数法	
	节点电压	无功功率	节点电压	无功功率
1	1.050 0	-0.201 9	1.052 7	-0.055 9
2	1.050 0	-0.127 0	1.045 9	0.084 9
3	1.029 0	-0.012 0	1.027 4	-0.012 0
4	1.023 6	-0.016 0	1.021 0	-0.016 0
5	1.030 0	-0.190 0	1.026 1	0.080 6
6	1.025 1	0.000 0	1.021 6	0.000 0
7	1.019 3	-0.109 0	1.015 6	-0.109 0
8	1.030 0	-0.300 0	1.024 8	0.107 5
9	1.045 4	0.000 0	1.043 7	0.000 0
10	1.042 6	-0.020 0	1.041 7	-0.020 0
11	1.050 0	0.000 0	1.048 6	0.028 8
12	1.051 2	-0.075 0	1.050 5	-0.075 0
13	1.050 0	0.000 0	1.050 1	-0.001 1
14	1.037 0	-0.016 0	1.036 5	-0.016 0
15	1.032 8	-0.025 0	1.032 5	-0.025 0
16	1.040 3	-0.018 0	1.039 5	-0.018 0
17	1.036 5	-0.058 0	1.035 7	-0.058 0
18	1.024 0	-0.009 0	1.026 6	-0.009 0
19	1.022 0	-0.034 0	1.026 2	-0.034 0
20	1.026 3	-0.007 0	1.031 4	-0.007 0
21	1.030 4	-0.112 0	1.028 8	-0.112 0
22	1.031 0	0.000 0	1.029 2	0.000 0
23	1.023 8	-0.016 0	1.021 7	-0.016 0
24	1.020 3	-0.067 0	1.015 7	-0.067 0
25	1.021 3	0.000 0	1.022 4	0.000 0
26	1.003 7	-0.023 0	1.004 8	-0.023 0
27	1.030 7	0.000 0	1.035 2	0.000 0
28	1.022 1	0.000 0	1.019 0	0.000 0
29	1.011 0	-0.009 0	1.021 6	-0.009 0
30	0.999 6	-0.019 0	1.016 9	-0.190 0

② 给定发电机节点电压相当于无差调节，这会造成无功功率的分配不尽合理。而本方法的无功分配由各发电机调差系数决定，只要调差系数选择合理，就能使无功分配趋向合理。

③ 由表 3 得，该方法在某省电网实际应用，可以看出无功的分配更加合理，系统的整体电压得到提升，更有利于电压的稳定。

3.2 较大规模电力系统

3.1 验证了计及发电机调差系数的潮流方法在

小规模电力系统的应用及其比较，下面将通过较大规模电力系统 IEEE118 节点验证该方法的可行性及优越性。IEEE118 节点系统共有 35 个发电机节点，83 个负荷节点，取调差系数分别为 0.05，收敛精度为 $\epsilon < 10^{-5}$ 。表 5 给出了部分计算结果，其中 1、66 节点为发电机节点，其余节点为负荷节点。传统牛顿法的迭代次数为 5 次，本方法的迭代次数为 6 次。对于表中未给出的节点，其计算结果与表中结果类似。

表 5 IEEE118 节点系统两种潮流计算方法对比 p. u.

节点	传统牛顿法		计及调差系数法	
	节点电压	无功功率	节点电压	无功功率
1	1.050 0	1.199 1	1.073 5	0.780 0
6	0.986 8	-0.220 0	1.038 8	-0.220 0
12	0.990 0	-0.067 5	1.042 5	0.155 4
18	0.964 2	-0.340 0	1.021 6	-0.340 0
24	0.992 0	-0.157 4	1.051 0	-0.020 4
30	0.985 2	0.000 0	1.031 1	0.000 0
36	0.982 7	-0.170 0	1.041 4	-0.170 0
42	0.985 0	0.180 4	1.041 6	0.174 1
48	1.020 6	-0.110 0	1.056 6	-0.110 0
54	0.955 0	-0.261 2	1.033 0	0.351 8
60	0.993 1	-0.030 0	1.051 4	-0.030 0
66	1.050 0	-0.197 1	1.079 3	-0.632 7
72	0.980 0	-0.103 0	1.048 4	0.033 6
78	1.001 4	-0.260 0	1.025 7	-0.260 0
84	0.981 8	-0.070 0	1.022 7	-0.070 0
85	0.987 6	-0.150 0	1.030 5	-0.150 0
86	0.988 4	-0.100 0	1.027 7	-0.100 0
92	0.992 9	-0.100 0	1.039 6	-0.100 0
98	1.023 5	-0.080 0	1.043 6	-0.080 0
104	0.970 4	-0.250 0	1.020 7	-0.250 0
110	0.972 0	-0.300 0	1.031 6	-0.300 0
118	0.945 9	-0.150 0	0.984 8	-0.150 0

计算结果表明本方法对较大规模电力系统同样适用，并且在收敛性上与传统法相差不大。由表 5 知，传统法计算出的节点电压大部分在 1.0 以下，而本方法计算出的节点电压大部分在 1.0 以上。对比两种方法发电机节点的无功功率，可以看出发电机发出的无功功率明显发生变化，这表明在加入发电机调差系数以后，无功的分配更加合理，电压的

分布更加稳定。

3.3 综合比较

取收敛精度为 $\epsilon < 10^{-5}$, 测试两种方法在迭代次数和迭代时间的差异, 结果如表 6 所示。两种方法的网损如表 7 所示。

表 6 迭代时间与迭代次数对比

测试系统	常规牛顿法		计及调差系数法	
	迭代时间/ s	迭代次数/ 次	迭代时间/ s	迭代次数/ 次
IEEE14	0.035	4	0.079	4
IEEE30	0.338	4	0.351	5
IEEE118	0.484	5	0.533	6
某省电网	0.071	5	0.076	6

从表 6, 我们可以得到以下结论:

① 在迭代时间上, 本方法与传统潮流方法差别不大。

② 在迭代次数上, 本方法虽比传统方法要多, 但差别很小。

表 7 两种方法的网损对比

测试系统	网损(p. u.)	
	传统牛顿法	计及调差系数法
IEEE14	0.146 3	0.141 0
IEEE30	0.067 8	0.052 2
IEEE118	1.347 8	1.209 9
某省电网	1.168 8	1.114 6

由表 7 可知计及发电机调差系数的潮流算法的网损显然比传统牛顿法小, 这在大规模电力系统的表现尤为明显。只要调差系数选择合适, 网损可进一步降低。

4 结束语

本文建立了计及发电机调差系数的潮流计算模型。该模型摒弃了传统潮流中将发电机节点设为 PV 节点的假设, 而将发电机节点的电压看成随无功功率而变化的变量。

计及发电机调差系数的潮流方法不仅适用于小规模电力系统, 在较大规模的电力系统也表现出

良好的优越性。与传统潮流法相比, 本文方法可使潮流计算结果更加准确, 无功功率在发电机之间的分配更加合理, 而计算耗时和迭代次数增加很少。并且在维持电压稳定降低系统网损方面具有优越性, 计算结果更加符合实际的电网运行状况。

参 考 文 献

- [1] Brown H E. Power flow solution by impedance matrix iterative method [J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1963, 82(65): 1-10.
- [2] Tinny W F, Hart C E. Power flow solution by newton's method [J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1978, 6(11): 1449-1460.
- [3] Iwamoto S, Tamura Y. A fast load flow method retaining nonlinearity [J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1978, 97(5): 1586-1599.
- [4] Iwamoto S, Tamura Y. Improved Newton's Load flow through a minimization technique [J]. IEEE transaction on power apparatus and systems, 1971, 90 (5): 1974-1981.
- [5] 包黎昕, 段献忠, 何仰赞等. 考虑发电机约束条件的潮流计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(17): 413-415.
- [6] 朱凌志, 周双喜. 电压稳定分析的潮流算法研究 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 1-4.
- [7] 孙艳, 杭乃善. 计及机组静态调节特性的电力系统潮流模型 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 43-49.
- [8] 孙春顺, 王耀南, 李欣然等. 计及发电机励磁调节器静态特性的电力系统潮流计算方法 [J]. 长沙理工大学学报, 2006, 3(2): 47-52.

收稿日期: 2014-02-25

作者简介:

智 勇(1970—), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统的运行分析与管理的科研与调试工作, E-mail: 2391448346@qq.com;

拜润卿(1976—), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统的运行分析与管理的科研与调试工作, E-mail: 773630408@qq.com;

梁福波(1984—), 男, 工程师, 从事电力系统的运行分析与管理的科研与调试工作, E-mail: liangfubo333@163.com.

(责任编辑: 林海文)