

用于改进潮流计算中 PV-PQ 节点类型 转换逻辑的非线性规划模型

李保卫, 李佩杰, 韦化

(广西大学 电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004)

A Nonlinear Programming Model for Improving Type Switching Logic of PV-PQ Nodes in Power Flow Calculation

LI Bao-wei, LI Pei-jie, WEI Hua

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

ABSTRACT: Due to the restriction of reactive power capacity, the type switching between PV and PQ nodes are often necessary in power flow calculation of power system, however, the numerical oscillation are often caused by traditional switching logic that leads to the divergence of power flow. To overcome this difficulty, the authors propose a nonlinear programming model solved by modern interior point algorithm to improve the type switching logic between PV and PQ nodes. Taking reactive power capacity as constraint condition, the proposed model controls system voltage by objective function, thus the type switching between PV and PQ nodes can be avoided. Meanwhile, the optimal configuration of reactive power can enhance the ability to maintain system voltage level and enlarge the reactive power margin. Using modern interior point algorithm for the solution, the proposed model is indicative of premium properties in coping with large-scale and heavy loaded power system. The superiority of the proposed model is verified by simulation results of IEEE 118-bus test system and an actual power system.

KEY WORDS: power flow calculation; type switching between PV and PQ nodes; nonlinear programming; interior point method; power system

摘要: 由于无功容量的限制, 电力系统潮流计算中经常要进行 PV-PQ 节点类型转换, 传统转换逻辑容易引起数值振荡, 甚至错误识别节点类型而导致潮流发散。针对该问题, 文中

提出一种非线性规划模型以改进 PV-PQ 节点类型转换逻辑, 采用现代内点算法求解。模型以无功容量作为约束条件, 通过目标函数控制系统电压, 避开了节点类型转换。同时, 无功的优化配置可以增强维持系统电压的能力, 增大无功裕度; 结合现代内点法求解, 模型表现出了处理大规模和重负荷系统的优良性能。对 IEEE-118 系统和一个实际系统的仿真验证了该模型的优势。

关键词: 潮流计算; PV-PQ 节点类型转换; 非线性规划; 内点法; 电力系统

0 引言

潮流计算是研究电力系统稳态运行特征的基本计算, 也是电磁暂态和机电暂态的出发点, 其结果广泛应用于电力系统规划设计、安全经济运行和继电保护整定等领域, 并成为众多电力系统高级应用软件的基础模块^[1]。在此领域, 研究人员做了大量的研究, 众多方法更多地关注于如何提高计算速度和精确性^[2-10], 其中牛顿-拉夫逊法和 P-Q 分解法得到了广泛应用。

潮流方程的非线性方程组存在多解^[11], 通常认为平启动得到的结果是可行的, 当结果违背技术实际时, 运用适当的策略调整^[12], 使电压、无功等参量回归到可行域, 其中 PV-PQ 节点类型转换具有代表性。电力系统中的发电机节点和中枢点具有维持系统电压稳定的功能, 这类节点称为电压控制节点, 简称压控节点。在潮流计算中, 一般设定其电压不变, 当此类节点无功容量不足以维持电压时就要进行节点类型转换。在临界点附近, 节点类型容易发生反复转换, 而不合理的转换逻辑可能得到静

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50467001, 50867001); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060593002); 广西自然科学基金资助项目(0448025); 广西研究生教育创新计划项目(2007105930808M046)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50467001, 50867001); Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (20060593002).

态电压的不稳定解^[13]。

文献[13]的模型引入互补约束，描述了无功上、下限约束和电压稳定性准则，准确反映了无功对电压的控制关系，是 PV-PQ 节点类型转换逻辑的改进，在数学上，该模型称为混合互补问题^[14]，是目前求解的难点^[15-17]。本文建立了如下非线性规划模型：以所有压控节点电压与设定值偏差最小为目标，以潮流方程和无功上下限为约束。模型保证了无功不越界，并且无功的优化配置可以实现对系统电压的有效控制。

1 数学模型

在潮流计算中，PV-PQ 节点类型转换模拟了电力系统无功注入对电压的控制，类型转换由无功计算量和电压的偏移方向决定^[13,18]。节点反复转换和数值振荡不可避免。

约束电力系统的无功出力，并松弛压控节点电压，建立如下模型：

$$\min \sum \omega_i (U_i - U_{0i})^2 \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri}, \quad i \in S_{PV} \quad (3)$$

其中：

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} U_i \sum_{j \in i} U_j Y_{ij} \cos \delta'_{ij} + P_{Di} - P_{Gi} \\ U_i \sum_{j \in i} U_j Y_{ij} \sin \delta'_{ij} + Q_{Di} - Q_{Ri} \end{bmatrix}, \quad i \in S_N$$

式中： $\mathbf{x} = [P_s, Q_s, Q_j, U_i, \delta_i]^T$ ， $i \in S_N$ ， $j \in S_{PV}$ ； P_s 、 Q_s 为平衡节点有功、无功出力； $\delta'_{ij} = \delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}$ ，其中 δ_i 为节点 i 的电压相角， α_{ij} 为节点 i 、 j 间线路导纳的相角； Y_{ij} 为节点 i 、 j 间线路导纳的幅值； P_{Di} 、 Q_{Di} 为节点 i 的有功、无功负荷； P_{Gi} 为节点 i 的有功出力； Q_{Ri} 、 \bar{Q}_{Ri} 、 \underline{Q}_{Ri} 为节点 i 的无功出力及其上、下限； U_i 、 U_{0i} 为节点 i 电压的计算值和设定值； ω_i 为节点 i 的权重因子； S_{PV} 为所有压控节点的集合； S_N 为所有节点的集合。

模型(1)~(3)以所有压控节点电压与设定值偏差最小为目标，以潮流方程和无功上下限为约束，设置权重因子反映电力系统各压控节点的重要程度。求解中，在无功约束与维持电压之间取得平衡，优化配置无功，增强了对压控节点母线电压的支撑能力。

按式(4)设定模型(1)~(3)中无功的上下限，即与

传统潮流模型等价：

$$\begin{cases} \bar{Q}_i = +\infty \\ \underline{Q}_i = -\infty \end{cases} \quad (4)$$

与传统潮流模型相比：按照式(4)取上下限，二者等价，传统潮流模型包含于模型(1)~(3)中；模型(1)~(3)考虑了无功容量的约束，可以一次性得到电力系统运行的可行解。

与 PV-PQ 节点类型转换逻辑相比：在无功备用充足的情况下，与之等价；在无功备用不足的情况下，避免了节点类型的机械识别和频繁转换，得到的结果更优；PV-PQ 节点类型转换对转换而来的 PQ 节点电压放开，其偏差量不能确定，失去了作为压控节点的意义，模型(1)~(3)可以控制该节点电压，使其偏离设定值最小化。

与文献[13]的模型相比，模型(1)~(3)容易求解，并允许电力系统运行中适当的电压裕度。本文采用现代内点法求解，不考虑权重因素，详细的求解技术可以参考文献[19-20]。

2 仿真结果与讨论

2.1 数据说明

在 Matlab 7.2 环境下，对 2 个 IEEE 标准系统和一个实际系统进行仿真，所有计算基于 WinXP/Intel 平台，计算机主频为 2.8 GHz，内存 512 MB。本文中电压及其偏差均取标么值。表 1 列出了 3 个系统的数据。

表 1 系统规模和 PV 节点数

Tab. 1 The size and PV-bus number of power systems			
系统	节点数	线路/变压器数	PV 节点数
IEEE-118 系统	118	179/11	53
IEEE-300 系统	300	409/107	68
S-1047 系统	1 047	1 209/164	151

为验证算法的鲁棒性，构造 2 个重负荷系统：将基态时 IEEE-118 系统中节点 59 的负荷从 277 MW/113 Mvar 增加到 1.020 GW/444 Mvar，称为系统 IEEE-118Z；将其进一步增加到 1.052 GW/501 Mvar，称为系统 IEEE-118X，此时处于静态电压稳定临界点，这里的静态电压稳定临界点是借助连续潮流工具得到的^[13,21]。

2.2 潮流的传统模型与规划模型比较

按式(4)的要求，这里取无功上、下限为(-1 000, 1 000)Mvar，规划模型与传统模型的计算结果见表 2。其中，规划方法的最大电压偏差在 10^{-5} 数量级以内，二者等价。

表 2 规划模型与传统模型压控节点最大电压偏差比较
Tab. 2 The maximum voltage deviation comparison of programming model with traditional model

模型	IEEE-118 系统	IEEE-300 系统	S-1047 系统
传统模型	0	0	0
规划模型	4.19×10^{-7}	1.40×10^{-5}	1.46×10^{-6}

2.3 潮流 PV-PQ 节点类型转换与规划模型比较

在规划模型中，压控节点无功逼近界限与节点类型转换相似，将 2 者作类比，比较 2 种方法发生类型转换的节点。在规划模型的结果中，不存在无功严格在界限上的情形，为方便对比，近似地将差额在 0.05 Mvar 以内看作在界限上。

对于 IEEE-118 系统，分别测试 PV-PQ 节点类型转换和规划模型，发生类型转换的节点和对应的电压偏差见图 1，图中：电压负偏差对应无功在上界，正偏差对应在下界。图中结果表明：无功注入增加，电压产生一个正的扰动，减少则产生一个负的扰动。这与电压稳定性准则一致，二者的解均为系统电压稳定解。



图 1 IEEE-118 系统 PV-PQ 节点类型转换与规划模型的在界点比较

Fig. 1 Comparison of buses whose reactive power are set at their limits in IEEE-118 power system

IEEE-118 系统包含 53 个 PV 节点，在 PV-PQ 节点类型转换中，有 6 个节点发生类型转换：19、32、34、92、103 和 105；规划模型中有 2 个：92 和 103。后者是前者的子集，节点个数为前者的 1/3。

PV-PQ 节点类型转换属于交替求解，先不考虑无功约束计算一个结果，然后检验无功是否越界，如果越界，则强制无功出力为界值，进行节点类型转换，处理办法比较粗糙；规划模型为联立求解，计算始末都同时考虑所有约束。二者相比，后者有完善的数学理论支撑。

对结果做进一步解释：

1) 在调整方面，规划模型从全局出发，最优配置无功，具有较高的灵活性，结果中无功在界限上的节点成倍减少，增大了系统稳定裕度。

2) 在节点 92 和 103，规划模型发生类型转换，PV-PQ 节点类型转换得到的电压偏差较大。说明两

节点处无功容量与需求差额较大，结果具有一致性。

3) 规划模型中节点 92 和 103 对应的电压偏差比 PV-PQ 节点类型转换小，验证了规划模型在控制 PV 节点电压上的优势。

表 3 列出了 PV-PQ 节点类型转换中所有发生类型转换的节点在规划模型中的无功出力和电压偏差情况，便于更详细地展现二者的差别与规划模型的优势。

表 3 PV-PQ 节点类型转换中发生类型转换的节点在规划模型中的无功出力与电压偏差

Tab. 3 The value of reactive power supply and voltage deviation in programming model of nodes whose type has been changed in PV-PQ node type switching

节点	电压偏差/ 10^{-3}	无功出力/Mvar	无功下限/Mvar	无功上限/Mvar
19	0.952	-7.09	-8	24
32	0.510	-12.67	-14	42
34	1.22	-6.40	-8	24
92	3.69	-2.97	-3	9
103	-7.40	40.00	-15	40
105	3.35	-7.84	-8	23

对基态 IEEE-118、重负荷 IEEE-118Z 和 IEEE-118X 3 个系统测试电压偏差，结果见表 4。可见，规划模型中节点电压的最大偏差较小，在重负荷情况下更加显著。

表 4 重负荷下系统压控节点最大电压偏差比较

Tab. 4 Comparison of the maximum voltage deviation in heavily loaded power systems

方法	IEEE-118 系统	IEEE-118Z 系统	IEEE-118X 系统
PV-PQ 节点类型转换	0.008 9	0.150 1	不收敛
规划模型	0.007 4	0.109 7	0.133 7

求解 IEEE-118X 系统，规划模型收敛，而 PV-PQ 节点类型转换在节点 69 发生类型反复转换而发散，连续潮流依据该特征将其归为约束诱导型分岔点，此时不存在电压稳定解。将规划模型的解代入潮流方程，该点的失配功率为 2.1539×10^{-5} ，压控节点的无功出力均在上下限内，验证了解的可行性；结果中并未发现异常节点，即该节点处无功注入在上限而节点电压高于设定值，或者无功注入在下限而节点电压低于设定值，该解为静态电压稳定解。

在 PV-PQ 节点类型转换中，压控节点由 PQ 节点重新转换为 PV 节点时，如果节点电压幅值有较大突变，则要引入阻尼因子减小数值振荡，加快收敛。阻尼因子的设定没有严格标准，常规情形下，取 0.5(表 4 取该值)时基本收敛，而对于 IEEE-118X 系统，在该值处不收敛，调整至 0.05，可以在 18 次收

敛, 结果中未发现异常节点, 这说明传统潮流模型的收敛性对阻尼因子有一定的依赖性。连续潮流结合 PV-PQ 节点类型转换, 沿着一定的负荷增长方向逐点计算 $P-V$ 曲线, 难以保证结果的高度精确^[21]。规划模型对重负荷情况可以稳定求解, 结果具有一定的参考价值。

2.4 采用现代内点法求解规划模型的收敛性和计算速度

测试 IEEE-118、IEEE-300 和 S-1047 系统, 检验模型与现代内点法相结合的收敛性能, 互补间隙的收敛曲线见图 2。互补间隙在迭代过程中迅速下降, 收敛性不受系统规模的影响, 迭代次数保持在 15 次以内。

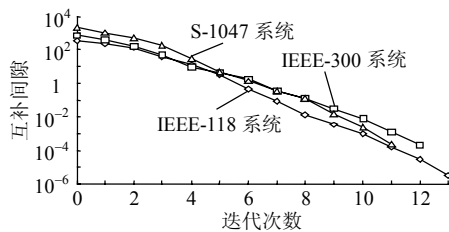


图 2 互补间隙在迭代过程中的收敛曲线

Fig. 2 Curves of the complementary gap in iterations

目标函数的下降情况见图 3, 不同规模系统的电压偏差均能稳定减小, 结果比初值低一个数量级以上, 控制效果良好。

表 5 和表 6 是对基态、重负荷以及大规模系统计算效率的测试结果, 模型(1)~(3)与现代内点法相结合, 具有稳定的收敛性和优良的计算效率, 对大规模系统收敛性能更优。

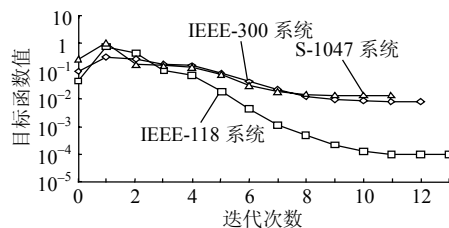


图 3 规划模型计算不同系统的目标函数值下降曲线

Fig. 3 Curves of objective-function value in iterations of programming model

表 5 规划模型对基态和重负荷系统的计算性能比较
Tab. 5 Comparison of the efficiency of programming model for normal and heavily loaded power systems

系统	迭代次数	目标值	收敛时间/s
IEEE-118	13	9.3282×10^{-8}	0.2621
IEEE-118Z	13	1.2422×10^{-3}	0.3122
IEEE-118X	13	3.1731×10^{-2}	0.3148

表 6 规划模型对不同规模系统的计算性能比较
Tab. 6 Comparison of the efficiency of programming model for different scales power system

系统	迭代次数	目标值	收敛时间/s
IEEE-118	13	9.3282×10^{-8}	0.2621
IEEE-300	12	7.7458×10^{-3}	0.7693
S-1047	11	1.3003×10^{-2}	1.4197

3 结论

本文针对 PV-PQ 节点类型转换的缺陷, 提出了非线性规划的替代策略。该策略便于将无功约束在其界限内, 优化无功配置以控制系统电压; 不需要节点类型识别转换, 易于编程实现。其计算量比传统方法大, 但与内点法相结合后的鲁棒性和高效率增强了其实用性。

参考文献

- [1] 魏文辉, 袁启海, 薛巍, 等. 类型扩展潮流计算的研究及应用[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 25-29.
Wei Wenhui, Yuan Qihai, Xue Wei, et al. Research and application of extended-type load flow calculation[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 25-29(in Chinese).
- [2] 邱家驹, 韩祯祥, 江晓东. 潮流计算中的 PIF 节点[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 323-327.
Qiu Jiaju, Han Zhenxiang, Chiang Hsiaocong. The PIF bus in power flow studies[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5): 323-327(in Chinese).
- [3] Chang S K, Brandwajn V. Adjusted solutions in fast decoupled load flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 726-733.
- [4] 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(6): 413-415.
Bao Lixin, Duan Xianzhong, He Yangzan, et al. Load flow calculation with limits of generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 413-415(in Chinese).
- [5] 乔振宇, 陈学允, 张粒子. 功率分解潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 77-84.
Qiao Zhenyu, Chen Xueyun, Zhang Lizi. A new concept of the separation of electrical power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 77-84(in Chinese).
- [6] 罗日成, 李卫国. 电力系统潮流计算的符号分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 25-29.
Luo Richeng, Li Weiguo. Symbolic analysis method for load flow calculation of power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 25-29(in Chinese).
- [7] 刘洋, 周家启, 谢开贵, 等. 预条件处理 CG 法大规模电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 89-94.
Liu Yang, Zhou Jiaqi, Xie Kaigui, et al. The preconditioned CG method for large scale power flow solution[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 89-94(in Chinese).
- [8] 王守江, 江兴月, 王成山. 含风力发电机组的配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 42-45.
Wang Shouxiang, Jiang Xingyue, Wang Chengshan. Power flow analysis of distribution network containing wind power generators [J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 42-45(in Chinese).

(下转第 43 页 continued on page 43)