

用虚拟变量法解无功和电压最优控制问题

OPTIMAL CONTROL OF REACTIVE POWER AND VOLTAGE BY
FICTITIOUS VARIABLES METHOD

赵尤新 李文沅
Zhao Youxin Li Wenyuan
(电气工程系)

摘要 提出了用虚拟变量方法解算电力系统无功和电压控制的线性模型。该方法从理论上保证了线性规划模型的可解性和最优性。试算 IEEE6节点以及49节点、155节点的实际系统,证明所提方法是可行的。

关键词 无功;电压;最优控制/虚拟变量

中国图书资料分类法分类号 TM714.3

ABSTRACT A method introducing fictitious variables for resolving the linear model of reactive power and voltages control in power systems is presented. The method theoretically guarantees the resolvability and optimization of linear programming model. This method has been proved successful by IEEE 6—node test system and the several practical power systems such as 49—node, 155—node systems.

KEY WORDS reactive power; voltage; optimal control / fictitious variable

0 概述

电力系统无功和电压最优控制,是保证系统安全经济运行的重要技术措施之一,它是以保证系统电压质量为前提,调整发电机端电压、无功补偿点无功和可调变压器变比,使系统的运行状态达到最优。

无功和电压最优控制模型和算法在国内外已做了大量研究。模型可分为线性模型和非线性模型。在最优化数学中,线性规划具有理论完善,方法成熟,计算速度快,收敛性好的特点,利用线性规划求解无功和电压最优控制的线性模型问题得到了广泛应用。应用线性规划求解可能面临两大问题:

1) 如何寻求实际电力系统中满足约束条件的可行潮流(但不是最优潮流)以满足线性规划本身要求的严格初始可行基。

2) 在优化过程结束后,可能出现状态变量违界的问题,如何使这些违界的状态变量回到约束集内,如系统本身问题无解,如何找出使问题有解的技术条件。目前国内外现有文献中在算法上尚未很好解决上述问题。初始可行基的寻找通常的办法是:凭借调度人员的经验或反复试算潮流。有的文献^[2]利用松弛技术寻求初始可行基,但这些方法都没有从理论上保证实际电

力系统的初始可行性。有的文献在解决状态变量违界时,采用利用敏感度进行人为调整,从而影响了结果的最优性。笔者提出了用虚拟变量的方法解决上述问题。从理论上可使电力系统无功和电压控制的线性模型在任意初始点开始,保证逐次线性规划自始至终的可解性;并能保证在问题本身无解时,给出使问题有解时系统必须满足的技术条件。所提出的虚拟变量法不仅适用无功和电压控制问题,类似的思想可以扩展到更为一般的逐次线性规划的问题之中。

1 数学描述

以网损为目标函数的无功和电压最优控制的线性模型可表达为:

$$\begin{aligned} \min \Delta P_L &= S_{Lu} \Delta u \\ \text{s.t. } \Delta V_D &\leq S_1 \Delta u \leq \overline{\Delta V_D} \\ \Delta Q_G &\leq S_2 \Delta u \leq \overline{\Delta Q_G} \\ \underline{\Delta u} &\leq \Delta u \leq \overline{\Delta u} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 Δu —控制变量(发电机端电压、补偿点无功、可调变压器变比)矢量;

ΔV_D —负荷节点电压矢量;

S_1, S_2 —分别为控制变量对负荷节点电压和发电机无功的敏感度矢量;

S_{Lu} —有功网损对控制变量的敏感度矢量。

各矢量的具体数学表达式见文献^[1]。潮流的等式约束隐含于敏感度之中。

为了从理论上保证式(1)的可解性和最优性,在式(1)的无功和电压控制的线性模型中引入无功虚拟变量 ΔQ_F ,使式(1)变为

$$\begin{aligned} \min \Delta P_L &= S_{Lu} \Delta u + M_F \Delta Q_F \\ \text{s.t. } \Delta V_D &\leq S_1 \Delta u + S_{VF} \Delta Q_F \leq \overline{\Delta V_D} \\ \Delta Q_G &\leq S_2 \Delta u + S_{QF} \Delta Q_F \leq \overline{\Delta Q_G} \\ \underline{\Delta u} &\leq \Delta u \leq \overline{\Delta u} \\ 0 &\leq \Delta Q_F \leq \overline{\Delta Q_F} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 ΔQ_F —无功虚拟变量;在解算中 ΔQ_F 可能取负值(这相当于在轻载运行情况下,这些节点上必须吸收无功功率以取得可行解),此时令 $\Delta Q_F = \Delta Q_{F_1} - \Delta Q_{F_2}$, $\Delta Q_{F_1}, \Delta Q_{F_2} \geq 0$ 以保证虚拟变量的非负性。

M_F —对应无功虚拟变量在目标函数中的系数;

S_{QF}, S_{VF} —分别为无功虚拟变量对发电机无功和负荷节点电压的敏感度。

无功虚拟变量表示的是在不是补偿点的负荷节点处虚设的无功注入量,当然原补偿点处若无功配置不合理同样可以设为无功虚拟变量。

由于引入了这些虚拟无功注入量,每个节点都有了无功源(电容或电抗),因此依靠发电机无功,原补偿设备无功和这些虚拟的注入无功共同调节,肯定不会出现因系统缺无功或局部无功过剩造成节点电压越限的情况。换句话说,肯定能存在满足约束集的可行解。另一方面,由于我们希望计算结果中尽量不出现非零的虚拟无功变量,只是在仅靠发电机无功和补偿设备无功不能保证得到可行解时,才迫不得已出现虚拟注入无功。因此在约束式中引入虚拟无功变量的同时,在目标函数中对这些变量加以惩罚,并让其系数 M_F 较其它控制变量的系数大很多。

上述的虚拟变量方法类似于非线性规划中的惩罚函数和线性规划中的大 M 法。但是在本

质上又有所不同。惩罚函数法的收敛特性对所选的惩罚因子大小有很大的依赖性。由于线性规划所具有的特点,这里引入虚拟变量之后,计算结果与虚拟变量在目标函数中系数选取没有强的依赖性,只需保证它们的系数比其它控制变量的系数大,各虚拟变量的系数增加同一倍数,计算结果仍然相同。线性规划中的大M法所对应的人工变量优化后必须为零,对应于原问题有最优解。而虚拟变量的引入对于网络结构合理,以及系统所给技术条件合理的情况下,虚拟变量只在优化迭代中出现,收敛后虚拟变量的值为零,这些虚拟变量的引入,只是起数字保证作用。即保证从任意初始点开始,逐次线性规划都肯定有解。如果实际系统结构或无功源位置及容量不尽合理,或者技术要求不合理,优化结果中,虚拟变量就会出现非零值以保证满足问题的约束条件下得到最优解。此时说明这些虚拟变量必须存在非零值时,现有的实际电力系统的无功和电压控制问题才能得到最优可行解。

综上所述:在一般的无功和电压控制的线性模型中,引入无功虚拟变量有如下特点:

- 1) 从理论上保证了解算逐次线性化的无功和电压控制线性模型在任意初始点上进行。
- 2) 控制问题在约束集内无解(如优化结果状态变量违界等)给出最优解存在的必要条件。
- 3) 还检验实际电力系统无功补偿点位置及容量的合理性。

2 解算方法

式(2)的线性模型,本文采用带上、下限的线性规划求解。程序用 FORTRAN 语言在一般 IBM-PC 机上编制,通用于一般 IBM 兼容机,解题规模为250个节点。

3 计算实例及结果分析

应用本文所述方法,在 IBM-PC 机上对 IEEE6节点、30节点以及我国某电网49节点、155节点系统进行了大量计算,并与文献^[2]所提的松弛变量方法进行了比较。为了说明方法的有效性和可行性,仅列出6节点系统的算例和155节点实际系统的优化结果。

如图 IEEE Wold HAIE 6节点系统

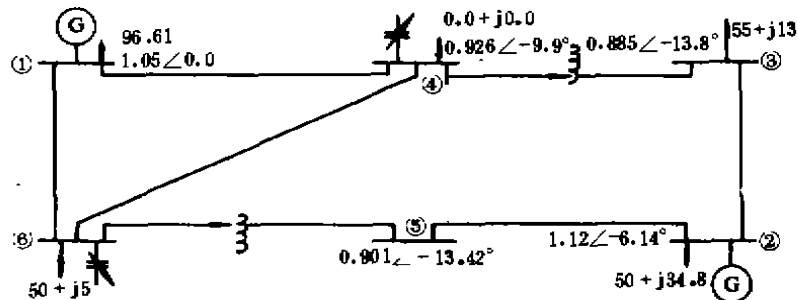


图 6节点系统初始潮流状况,系统损耗为11.61MW

3.1 保证在任意初始点优化的可行性检验

为了检验本文所提方法可使无功和电压控制问题在任意初始点上进行,采用文献^[2]的方法和本方法,在不同的初始点开始进行优化计算。文献^[2]由于采用了松弛技术,即使系统结构和技术要求合理的情况,只能获得次优解。本文方法优化结果优于文献^[2]。在系统结构和技术要求合理时,虚拟变量仅出现在优化迭代中,终值为零,其结果比较见表1。

表 1

节 点	优 化		结 果		迭代中 无功虚拟 变量节点	虚拟变 量终值
	文 献 [2] 电 压	无功补偿	本 方 法 电 压	无功补偿		
1	1.1		1.1			
2	1.134		1.15			
3	1.0		1.0		✓	0
4	1.0	5.0	1.0	4.98		
5	1.0		0.995		✓	0
6	0.98	5.5	0.992	5.49		
网损	8.89		8.81			
备注	负荷电压要求变动范围 0.95~1.0					

3.2 控制问题在约束集内无解(或状态变量越界)时,保证其问题的有解性检验

为了检验此问题,设6节点系统中节点2的电压上限从1.15降至1.08,分别用文献[2]方法和本文方法求解,其结果如表2。

表 2

节 点	优 化		结 果		迭代中出 现的无功 虚拟变量	虚拟变量 优化终值
	文 献 [2] 电 压	无功补偿	本 文 方 法 电 压	无功补偿		
1	1.1		1.1			
2	1.08		1.08			
3	0.97		0.987			
4	0.97	3	0.984	4.8		
5	0.93		0.96	0.18	✓	0.18
6	0.96	5.1	0.96	5.49		
网损	9.8		9.4			
备注	负荷节点电压允许范围 0.95~1.05					

从表2看出,由于节点2的电压上限较低,导致节点5的电压越界。若常规方法无法解决越界问题,采用虚拟变量法,在节点5中引入了无功虚拟变量,优化结果指出,在给定的发电机端电压的技术条件下,要使该控制问题在约束集内有最优解。节点5必须新增无功补偿量0.18MVAR。

3.3 评估系统无功规划点及补偿容量合理性的检验

假设系统中原来没有无功补偿,节点2电压上限为1.08,文献[2]和本方法求解结果见表3。

从表3中看出,原系统在无功补偿及系统技术条件不合理时,文献[2]的结果出现了状态变量越界,用于文方法计算,虚拟变量自动出现在优化迭代中,以保证控制问题的可解性。优化结果给出了满足系统负荷要求所需增设的补偿点及无功补偿量,从而检验了原系统无功补偿点及无功补偿量,从而检验了原系统无功补偿的合理性。

表 3

节 点	优 化		结 果		优化迭代 中虚拟 变量点	虚拟变 量终值
	文 献 [2] 电 压	无功补偿	本 文 方 法 电 压	无功补偿		
1	1.1		1.1			
2	1.08		1.08			
3	0.953		0.963			
4	0.97		0.985			
5	0.91		0.953	1.4	✓	1.4
6	0.95		0.98			
网损	10.03		9.2			
备注	设原系统无补偿点负荷电压允许0.95~1.05					

3.4 155节点实际系统的计算检验

为了检验本文所提方法对实际系统的无功和电压最优控制问题的有效性,对四川某155节点实际系统进行了分析计算,并与文献[2]所提方法所计算的结果进行了比较,其结果见表4。

表 4

方 法	电压 合格率	总补偿 无功容量	系统网络 有功损耗	计算 速度	迭代中无功 虚拟变量节点数	虚拟变量 终 值
文献[2]	98%	0.3325	0.1305	12'	/	/
本文方法	100%	0.3508	0.1275	10'	11	0.0183
备 注	该计算结果在 IBM-286 机上计算所得,表中结果均为标么值。原网络中节点34不是补偿点,导致采用文献[2]方法计算4个节点电压超限。					

4 结 论

1) 无功虚拟变量的引入,使每个节点都有了无功源,在理论上保证了电力系统在任意初始点存在满足控制问题约束集的可行解(线性规划所要求的初始可行基),使优化问题可在任意初始点进行。

2) 在无功和电压控制的线性规划模型中引入无功虚拟变量,在实际系统结构不合理和技术条件不合理时保证控制问题在约束集内无解时给出存在最优解的必要条件。

3) 本文提出的解算一般线性规划模型的虚拟变量方法是有效可行的。

参 考 文 献

- 1 赵尤新. 用敏感度分析方法计算电力系统无功和电压最优控制问题. 重庆大学1985年硕士论文
- 2 赵尤新. 敏感法无功最优潮流. 重庆大学学报, 1988, 11(4): 45~49
- 3 李文沅. 电力系统安全经济运行—模型与方法. 重庆: 重庆大学出版社. 1989