

电力系统电压和网损优化计算^{*}

李林川 夏道止 杨振平 王立成 王向新 张莉芳
(天津大学电力系·300072) (西安交通大学·710049) (银川供电局·750001)

【摘要】 采用非线性规划中的梯度法,进行电力系统的电压、网损优化计算。其中补偿节点的处理,开始均作为PV节点,计算结束前转化为实际的补偿量。步长由电压的最大误差比梯度的最大分量来决定,使得计算速度大大加快。对于一天24h的优化,在保证电压合格率的前提下,减少了可调设备动作的次数,使得总体经济效益较优。所编程序通过银川供电局较长时间的实际使用,证明原理正确,经济效益显著。

【关键词】 电力系统 电压优化 网损优化

1 前言

电压合格率是衡量电能质量的一个重要指标,它是各节点电压在运行时间内,电压合格的时间比上总的运行时间的百分数。在电力系统运行中,如何调整那些可调设备,得到运行时间中电压合格率满足要求且网损最小的运行方式,是一个重要问题。

本文对于一天24h的计算,按照小时进行,在每小时内,负荷近似相等,一天24h有24个负荷,从而寻求一天的优化运行方式。考虑到可调设备的寿命,因而在电压合格率满足要求的前提下,应尽量减少可调设备的动作次数,这能使总体经济效益最好。文中称这种一天内的优化为综合优化。

2 单一小时优化计算原理

2.1 梯度向量的求取

我们所求的是满足电压约束条件下的有功损耗最小的潮流解,所以增广目标函数是网损和越界电压的罚函数两项,即

$$F = P_1(U, \delta) + W \sum_{i=1}^n (\Delta U_i)^2 \quad (1)$$

其中 $P_1(U, \delta) = U_1 \sum_{j \in 1} U_j (G_{1j} \cos \delta_{1j} + B_{1j} \sin \delta_{1j})$; W 为罚因子; U 为节点电压幅值; δ 为节点电压相角。

* 1994—12—06 收稿。

李林川,男,1948年生,副教授,主要从事电力系统运行与控制的研究。

夏道止,男,1936年生,教授,博士生导师,主要从事电力系统运行与控制、电力系统谐波和电力系统稳定等方面的研究。

$$\Delta U_i = \begin{cases} U_i - U_{i\max} & \text{当 } U_i > U_{i\max} \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \text{ 时} \\ U_i - U_{i\min} & \text{当 } U_i < U_{i\min} \text{ 时} \end{cases}$$

$P_1(U, \delta)$ 是平衡机的有功输出, 假定节点 1 为平衡机, 选择平衡机的有功输出为目标函数就相当于把系统的网损作为目标函数, 这是因为在潮流计算中, 除平衡机外, 其它发电机的有功功率都是给定的, 要使网损最小, 也就等于使平衡机的有功最小。

由于在高压电网中, 各节点电压的幅值主要与无功功率有关, 因而在电压优化中, 等式约束可只考虑潮流的无功方程:

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

($i = 1, 2, \dots, n; i \neq PV$ 节点与 $V\delta$ 节点)

其中 Q_{Gi} 、 Q_{Di} 分别为 i 节点发电机无功和负荷无功; n 为系统节点总数; G_{ij} 、 B_{ij} 为 i 、 j 节点导纳矩阵中元素的实虚部; δ_{ij} 为 i 、 j 节点间的电压相角差。

不等式约束是各节点电压和无功电源的上下限, 以及带负荷可调变压器的变比上下限。

即

$$\begin{aligned} U_{i\min} &\leq U_i \leq U_{i\max} & (i = 1, 2, \dots, n) \\ Q_{Gi\min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} & (i = 1, 2, \dots, GS) \\ K_{i\min} &\leq K_i \leq K_{i\max} & (i = 1, 2, \dots, m_3) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 GS 是系统发电机和调相机总台数; K_i 是带负荷可调变压器变比; m_3 是系统带负荷可调变压器台数。

对于并联电容器或电抗器补偿的无功电源, 开始把它作为 PV 节点处理, 而在计算临近结束时, 再转化为具体的并联电容器或电抗器。

对于以上数学模型, 把增广目标函数和等式约束一起写成拉格朗日函数

$$L = F + \lambda^T \Delta Q \quad (4)$$

式中 λ ——拉格朗日乘子。

变量的划分是各 PQ 节点的电压 U 为状态变量, 用向量 x 表示之; 各 PV 节点和 $V\delta$ 节点的 U 和 PQ 发电机节点的无功功率 Q_G 以及可调变压器的变比 K 等为控制变量, 用向量 u 来表示。

即

$$\begin{aligned} x &= U \\ u &= [U, Q_G, K]^T \end{aligned}$$

拉格朗日函数对状态变量和控制变量的偏导数分别为

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial F}{\partial x} + \left[\frac{\partial \Delta Q}{\partial x} \right]^T \lambda \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial u} = \frac{\partial F}{\partial u} + \left[\frac{\partial \Delta Q}{\partial u} \right]^T \lambda \quad (6)$$

令 (5) 式等于零, 得

$$\left[\frac{\partial \Delta Q}{\partial u} \right]^T \lambda = - \frac{\partial F}{\partial x} \quad (7)$$

从 (7) 式可解出 λ , 代入 (6) 式可得

$$\frac{\partial L}{\partial u} = \frac{\partial F}{\partial u} - \left[\frac{\partial \Delta Q}{\partial u} \right]^T \left[\left(\frac{\partial \Delta Q}{\partial u} \right)^T \right]^{-1} \frac{\partial F}{\partial x} \quad (8)$$

可以证明 $\partial L / \partial u$ 就是增广目标函数对控制变量的梯度向量, 即

$$\nabla F_u = \frac{\partial L}{\partial u} \quad (9)$$

2.2 步长 α 的决定

当求出梯度向量后, 下一步就是决定修正步长, 为了加快计算速度, 不采用求最优步长的方法, 而选用电压正的最大误差量与梯度最大分量的比值和电压负的最大误差量与负梯度最大分量的比值两者之中的最大者来决定 α 值。具体求法如下:

$$\alpha_1 = \frac{\Delta U_{\max}^+}{\nabla F_{\max}^+}, \quad \alpha_2 = \frac{\Delta U_{\max}^-}{\nabla F_{\max}^-}$$

步长 α 取用 α_1 和 α_2 之中较大者。

为了避免步长过大, 引起潮流不收敛或增加迭代次数, 对于 ΔU_{\max} 进行了限幅处理。当 $|\Delta U_{\max}|$ 大于某一数值 $\Delta U_{\text{限}}$ 时, 让它等于 $\Delta U_{\text{限}}$ 。实践证明, 这种方法是十分有效的。

2.3 控制变量的修正

当求出梯度向量和步长 α 之后, 即按下式修正控制变量:

$$u^{(k+1)} = u^{(k)} - \alpha \nabla F_u^{(k)} \quad (10)$$

其中 k —— 迭代次数。

对于发电机或调相机, 由于控制变量 U 或 Q 是连续变化的, 当按(10)式求出的新值超出给定的上限或下限时, 则把它限制在相应的边界上, 否则不需作任何处理。

对于可调变压器的变比调节是按分接头进行的, 对(10)式求出的 $u^{(k+1)}$ 值采用四舍五入归整, 使得每次调节都是在分接头上变化, 同时也按变比的上、下限进行限幅处理。

对于并联电容器或并联电抗器补偿, 当迭代到越界电压很小时, 根据该点无功的需要量以及该点可补偿的组数和每组的阻抗值进行换算, 同样采用归整的方法, 最后决定投入的组数, 随后将该点由 PV 节点转化为 PQ 节点。

值得指出的是, 当可调变压器变比变化后, 以及并联电容器或电抗器投入后, 导纳矩阵都应作相应的修改。

3 综合优化计算原理

从原理上来说, 有了每小时的优化, 一天 24 h 的优化, 可以重复进行 24 次优化, 即可得出 24 h 的优化值。这样的结果对于电压合格率来说, 可达到较高的值, 但某些设备, 如可调变比和补偿的投切, 有可能有 24 个不同的值。这些带电设备的频繁动作, 会相应减少该设备的使用寿命, 也就是说要增加设备费用。为了考虑这个因素, 对于 24 h 的优化, 应在电压合格率的前提下, 尽量减少这些可调设备的动作次数, 这就是本文所指的综合优化, 其基本原理如下:

(1) 根据预测或给定的 24 h 负荷值 (总负荷和各节点负荷), 按照负荷变化的大小, 把 24 h 划分为几个大的时段, 一般为 3~5 个时段。

(2) 对于划分在同一时段的各小时, 从中取各节点的平均负荷, 然后按单一小时的计算方法进行优化, 确定可调变比和补偿的投切, 然后在这变比和补偿的投切下, 再对这一时段中各小时按实际负荷进行优化, 这时可控变量只是发电机的电压值。

(3) 计算出各时段和总的电压合格率, 若总电压合格率不满足要求, 则挑出电压合格率最低的时段, 把这一时段划分为两个时段, 然后重新优化这两个时段。

(4) 重复第(3)步直到电压合格率满足要求为止。

4 使用情况

用该原理所编程序, 从 1992 年开始在银川供电局使用, 按优化结果安排运行方式, 电压合格率可提高 10% 以上, 网损率可减少 0.03% 左右, 一年可节电 30 万 kWh, 表 1 和表 2 列出了 1993

年 10 月 6 日使用情况对比。

表 1 全网电压合格率统计表

Table 1 Qualification rate of Yingchuan network voltage

方 式	6—10 kV 母 线	35 kV 母 线	110 kV 母 线	35 kV 及以上专线用户	总电压 合格率
未优化方式	82.2%	92.7%	43.8%	100%	86.4%
优化后方式	97.7%	100%	100%	100%	99.6%

表 2 全网电量和损耗 (单位: 万 kWh、万 kvarh)

Table 2 Total electric quantity and loss of the network

方 式	全网发电有功	全网负荷有功	全网有功损耗	有功损耗率
未优化方式	337.26	329.05	8.25	2.455%
优化后方式	337.14	329.05	8.16	2.42%

5 结论

(1) 本文所提方法, 由于梯度的计算比较简单, 内存量在原潮流程程序的基础上增加很少, 因而在微机上可算较大题目。

(2) 所提计算步长的方法, 计算速度快, 收敛特性好。

(3) 综合优化计算, 既保证了电压合格率, 又减少了可调设备的变动次数, 使得总体效益较好。

参 考 文 献

- 1 Stott B, Alsac O. Fast Decoupled Load Flow. IEEE Trans Vol. PAS-93: 859~869
- 2 陈 珩. 电力系统稳态分析. 水利电力出版社, 1995
- 3 文 矩, 李林川. 电力系统最优运行. 西安交通大学出版社, 1988

AN OPTIMAL CALCULATION OF VOLTAGE AND LOSS IN POWER SYSTEM

Li Linchuan (Tianjin University)

Xia Daozhi, Yang Zhenping (Xi'an Jiaotong University)

Wang Licheng, Wang Xiangxin, Zhang Lifang (Yingchuan Electric Power Supply Bureau)

Abstract In this paper we use the gradient method of nonlinear programming for optimal calculation of voltage and loss in power system. For compensation joint, we first consider it as PV joint and transform it into real compensation at the end of computation. The step is determined by the ratio of gradient and voltage error. A method for 24 hours optimal calculation is also proposed.

Keywords power system voltage optimization loss optimization