

输电网络的分层分区电压无功调节方法

颜伟¹, 高强¹, 余娟¹, 杜跃明²

- (1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400030;
2. 余杭供电局, 浙江省 杭州市 311100)

An Algorithm for Hierarchical and Partitioned Regulation of Voltage and Reactive Power in Transmission Network

YAN Wei¹, GAO Qiang¹, YU Juan¹, DU Yueming²

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400030, China; 2. Yuhang Power Supply Bureau, Hangzhou 311100, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: According to the principles of hierarchical and partitioned balance and local compensation of reactive power as well as the principle of contrary regulation of voltage, a method for voltage and reactive power regulation in transmission network is proposed. Firstly, the concepts such as partition in the same hierarchy and its load factor, reactive power regulation ability and unbalancedness degree of reactive power are defined and used to determine ideal targets of reactive power balance and contrary regulation of voltage and to evaluate reactive power balance level. On this basis, a hierarchical and partitioned regulation strategy of voltage and reactive power is put forward, and the regulation strategy consists of three stages: global voltage and reactive power regulation, hierarchical and partitioned regulation of voltage and reactive power and local regulation of voltage and reactive power of terminal substations. The features of power flow in every single stage are analyzed and the regulation rules of voltage and reactive power in each stage are drafted for the aims of making the voltage of whole network conforming to the guide as well as implementing hierarchical and partitioned reactive power balance as possible. The availability of the proposed algorithm is verified by the results of calculation example.

KEY WORDS: hierarchical and regional balance; local compensation; contrary regulation of voltage; reactive power regulation ability; unbalancedness degree of reactive power

摘要: 基于无功的分层分区平衡与就地补偿原则、中枢点电压的逆调压原则, 提出了输电网络电压无功调节方法。首先定义了同层区及其负载率、无功调节能力和无功不平衡度等

概念, 以此来确定无功平衡与逆调压的理想目标, 评估电网的无功平衡水平。在此基础上提出了分层分区的电压无功调节策略, 该策略包括 3 个阶段: 1) 全局电压无功调节; 2) 无功的分层分区平衡调节; 3) 终端变电站的局部电压与无功调节。分析了每个阶段的潮流特征, 制定了各阶段的电压无功调节规则, 尽可能实现全网的电压合格和分层分区的无功平衡。算例结果验证了该方法的有效性。

关键词: 分层分区平衡; 就地补偿; 逆调压; 无功调节能力; 无功不平衡度

0 引言

实现电压无功的分层分区控制与无功就地平衡是电力系统电压无功调节的基本原则, 其对于保证系统电压质量和提高无功运行的经济性非常重要。

根据电压无功的分层分区控制与无功就地平衡原则, 经验丰富的电网运行工程师可有效进行电压无功管理, 以保证电压质量, 使系统无功分布比较均匀, 降低有功损耗^[1-4]。调度人员无需进行复杂的优化计算即可对当前系统的潮流运行状态进行简单分析, 如可观察系统电压是否合适、系统是否存在全局性的电压过高或过低、系统是否存在大量无功的远距离传输、各变电站的无功是否基本平衡、系统是否存在大量无功倒送或无功负荷很大而补偿设备未投入等问题。在分析以上问题后, 调度人员可确定当前系统电压无功运行的薄弱环节, 并根据经验制定有效运行方案, 调节发电厂和变电站电压无功。

相对于电压无功的经验调节, 基于内点法^[5-8]或智能优化算法^[9-10]的现代无功优化方法具有严格的理论基础, 理论上可获得网损最小或电压质量最

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090191120019)。

Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (20090191120019).

高的局部或全局最优解。但当系统的电压无功调节能力不足而导致优化计算不收敛时，现代优化方法无法确定具体的系统运行薄弱环节，其结果没有指导意义。

为此，借鉴电网运行工程师的专家经验，本文提出输电网络厂站电压无功调节方法。该方法以实现无功的分层分区与就地平衡和中枢点电压的逆调压原则为目标，通过全局电压无功调节、无功的分层分区平衡调节、终端变电站的局部电压与无功调节，实现全网的电压合格和分层分区的无功平衡。

1 同层区及其负载率、无功调节能力与无功不平衡度

1.1 同层区

本文定义由同一电压等级输电线路构成的连通电网及与该电网直接相连的发电厂和变电站位于一个同层区，其中，连接上一电压等级电网的变电站为该同层区的联络变电站，连接下一电压等级电网的变电站为该同层区的终端变电站。终端变电站为同层区的无功负荷，最高电压等级同层区的无功电源只有发电厂(发电机组)，其他电压等级同层区的无功电源可能同时有发电厂和联络变电站。同层区的电压中枢点为其无功电源的关联母线，对于发电厂，该母线是其高压母线，而对于联络变电站，该母线为其中压侧母线。

图1为2层等值电网，该电网包括2个同层区，1区为500kV网络，2区为220kV网络， B_{11} 、 B_{12} 、 B_{13} 、 B_{21} 、 B_{22} 、 B_{23} 为母线。1区的终端变电站为 T_1 和 $T_{1,2}$ ，无功电源为发电厂 G_1 ，电压中枢点为 B_{11} ；2区的终端变电站为 T_2 ，无功电源为 G_2 、 $T_{1,2}$ ，电压中枢点为 B_{21} 、 B_{23} 。显然，联络变电站 $T_{1,2}$ 关联上下2级同层区，既是上级同层区的终端变电站，又是下级同层区的无功电源。

本文设定的电压无功控制对象为发电厂、变电站(其中包括终端变电站和联络变电站)和同层区。

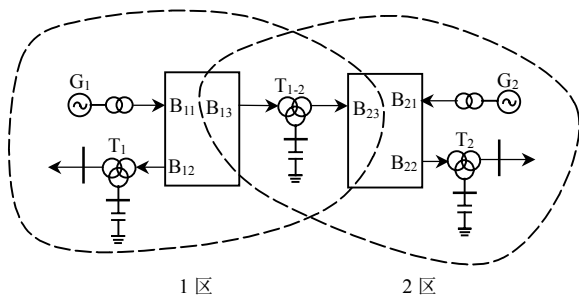


图1 2层等值电网

Fig. 1 A two-layer equivalent network

控制对象输出的无功为正表示感性无功，输出的无功为负表示容性无功。

1.2 同层区负载率

同层区内，当输电线路传输功率较大时，线路的感性无功损耗大于其对地电容的容性无功损耗，线路呈无功负荷状态，需要区内无功设备向其提供无功缺额。同时为了减少无功缺额和降低有功损耗，要求区内电压运行于较高水平。反之，当输电线路传输功率较小时，线路呈无功电源状态，需要区内无功设备吸收网络过剩无功，同样为了减少无功缺额和降低有功损耗，要求区内电压运行于较低水平^[11]。

因此，本文定义同层区的负载率 β_i 为区内所有线路的感性无功损耗与容性无功损耗之比

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_l} \Delta Q_{R,j}}{\sum_{j=1}^{n_l} \Delta Q_{C,j}} \quad (1)$$

式中： n_l 为同层区 i 的线路条数； $\Delta Q_{R,j}$ 和 $\Delta Q_{C,j}$ 分别为区内线路 j 的感性无功损耗和容性无功损耗。

根据 β_i 可确定同层区的中枢点电压及变电站一次侧功率因数的理想目标值。

1.3 发电厂、变电站和同层区的无功调节能力

本文定义控制对象的无功调节能力为：在当前输出无功的基础上，控制对象还能继续增加的最大可调或最大允许可调的感性(容性)无功的能力。控制对象的无功调节能力确定过程如下：1)只考虑发电厂机组或变电站补偿设备的无功容量限制，确定其无功调节的最大值；2)再考虑变电站一次侧进线的功率因数约束，确定其无功调节的最大允许值；3)发电厂的最大无功可调值等于其无功调节最大允许值。同层区的无功调节能力等于区内所有变电站与发电厂的无功调节能力之和。

根据上述定义，结合控制对象的当前输出无功、可输出无功和功率因数约束，可构造各类控制对象的无功调节能力如下：

$$\begin{cases} dQ_{x,R,M,i} = Q_{x,R,M,i} - Q_{x,i}, & Q_{x,i} < Q_{x,R,M,i} \\ dQ_{x,C,M,i} = Q_{x,C,M,i} - Q_{x,i}, & Q_{x,i} > Q_{x,C,M,i} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} dQ_{T_1,R,YM,i} = P_{T_1,i} \tan \varphi_{1\max} - Q_{T_1,i} \\ dQ_{T_1,R,YM,i} = \min \{dQ_{T_1,R,M,i}, dQ_{T_1,R,YM,i}\} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} dQ_{T_1,C,YM,i} = P_{T_1,i} \tan \varphi_{1\min} - Q_{T_1,i} \\ dQ_{T_1,C,YM,i} = \max \{dQ_{T_1,C,M,i}, dQ_{T_1,C,YM,i}\} \end{cases} \quad (4)$$

$$dQ_{A,R,M,i} = \sum_{j=1}^{n_l} dQ_{T_1,R,M,j} + \sum_{k=1}^{n_g} dQ_{G,R,M,k} \quad (5)$$

式中: dQ 表示无功调节能力; $Q_{x,R,M,i}$ 、 $Q_{x,i}$ 、 $Q_{x,C,M,i}$ 分别为发电厂机组或者变电站补偿设备的最大可输出感性无功、当前输出无功和最大可输出容性无功, 下标 x 可以为 G(发电厂)或 T(变电站), 对于发电厂, $Q_{G,R,M,i}$ ($Q_{G,C,M,i}$) 为发电厂的最大可输出感性(容性)无功, 等于其最大允许输出感性(容性)无功 $Q_{G,R,YM,i}$ ($Q_{G,C,YM,i}$); $Q_{T,R,YM,i}$ 为变电站补偿设备的最大允许输出感性无功; $P_{T,i}$ ($Q_{T,i}$)、 $\tan \varphi_{1\max}$ ($\tan \varphi_{1\min}$)、 $Q_{T,R,YM,i}$ ($Q_{T,C,YM,i}$) 分别为变电站一次侧当前的输出有功(无功)、功率因数最大(最小)允许值对应功率因数角的正切值和最大允许输出的感性(容性)无功; $Q_{A,R,M,i}$ 为同层区 i 的最大可输出感性无功; n_t 和 n_g 分别为同层区 i 中的变电站数量和发电厂数量。

与此类似, 可构造出各种控制对象的无功调节能力。

1.4 发电厂、变电站和同层区的无功不平衡度

发电厂的无功平衡约束由其发电机组的无功约束决定, 变电站的无功平衡约束由其一次侧进线功率因数约束决定, 同层区的无功平衡约束由其内部发电厂和变电站的综合无功平衡约束决定。变电站(发电厂)的无功平衡约束满足要求时, 其无功不平衡度为 0; 发电厂机组或者变电站补偿设备输出感性无功过多时, 其无功不平衡度大于 0; 发电厂机组或者变电站补偿设备吸收感性无功过多时, 其无功不平衡度小于 0。同层区的无功不平衡度等于区内所有发电厂和联络变电站的无功不平衡度的代数和。

根据上述定义, 构造各类无功控制对象的无功不平衡度为

$$\alpha_{x,i} = \begin{cases} 0, & Q_{x,i} \in [Q_{x,C,YM,i}, Q_{x,R,YM,i}] \\ Q_{x,i} - Q_{x,R,YM,i}, & Q_{x,i} > Q_{x,R,YM,i} \\ Q_{x,i} - Q_{x,C,YM,i}, & Q_{x,i} < Q_{x,C,YM,i} \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha_{A,i} = \sum_{j \in \psi_G} \alpha_{G,j} + \sum_{k \in \psi_{TL}} \alpha_{T,k} \quad (7)$$

式中: $\alpha_{x,i}$ 为发电厂($x=G$)或变电站($x=T$)的无功不平衡度; $Q_{x,R,YM,i}$ ($Q_{x,C,YM,i}$) 为变电站补偿设备的最大允许输出感性(容性)无功; $\alpha_{A,i}$ 为同层区的无功不平衡度; ψ_G 和 ψ_{TL} 分别为同层区 i 的发电厂集合与联络变电站集合。

由上述定义可知, 理想情况下, 当所有控制对象的无功不平衡度均为 0 时, 则全网无功实现了分层分区与就地平衡。实际中由于无功潮流分布

不均, 控制对象的无功调节能力不同, 这将导致系统很难始终保持完全的无功平衡。因此本文在实施无功平衡调节时, 采用以下原则: 首先必须使 $\alpha_{G,i}$ 等于 0; 其次尽量使 $\alpha_{A,i}$ 等于 0; 最后尽量使 $\alpha_{T,i}$ 等于 0。

1.5 逆调压与就地无功平衡的理想调节目标

调节中枢点电压时, 本文充分考虑逆调压原则, 并根据同层区 i 的负载率确定其中枢点电压的逆调压目标 $U_{aim,i}$ [12]:

$$U_{aim,i} = \begin{cases} 1.015, & \beta_i \leq 1 \\ 1.015 + 0.04 \frac{\beta_i - 1}{1.2 - 1}, & 1 < \beta_i < 1.2 \\ 1.055, & \beta_i \geq 1.2 \end{cases} \quad (8)$$

变电站就地无功平衡调节时, 本文充分考虑变电站及同层区的负荷情况, 确定变电站就地无功平衡的理想调节目标。

考虑变电站的负荷轻重情况, 根据变电站负载率 α_i 确定一次侧进线功率因数目标 $\cos \varphi_{1aim,\alpha}$ 为 [12]

$$\cos \varphi_{1aim,\alpha} = \begin{cases} \cos \varphi_{1\min}, & \alpha_i \leq 0.5 \\ \cos \varphi_{1\min} + (\cos \varphi_{1\max} - \cos \varphi_{1\min}) \frac{\alpha_i - 0.5}{0.8 - 0.5}, & 0.5 < \alpha_i < 0.8 \\ \cos \varphi_{1\max}, & \alpha_i \geq 0.8 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\cos \varphi_{1\max}$ 和 $\cos \varphi_{1\min}$ 分别为变电站一次侧进线功率因数的最大和最小允许值。

考虑同层区的无功需求, 根据同层区负载率 β_i 确定一次侧进线功率因数目标 $\cos \varphi_{1aim,\beta}$ 为

$$\cos \varphi_{1aim,\beta} = \begin{cases} \cos \varphi_{1\min}, & \beta_i \leq 0.9 \\ \cos \varphi_{1\min} + (\cos \varphi_{1\max} - \cos \varphi_{1\min}) \frac{\beta_i - 0.9}{1.1 - 0.9}, & 0.9 < \beta_i < 1.1 \\ \cos \varphi_{1\max}, & \beta_i \geq 1.1 \end{cases} \quad (10)$$

为充分协调同层区和区内变电站的负荷水平与其无功补偿量, 最终确定的变电站一次侧进线理想功率因数目标 $\cos \varphi_{1aim,i}$ 为

$$\cos \varphi_{1aim,i} = (\cos \varphi_{1aim,\alpha} + \cos \varphi_{1aim,\beta}) / 2 \quad (11)$$

2 电压无功调节方法

2.1 电压无功调节步骤

输电网络的分层分区电压无功调节步骤如下:

1) 分析系统拓扑结构, 划分同层区, 计算系统初始潮流。

2) 进行全局电压无功调节, 每进行一个阶段的调节后都要进行潮流计算。

3) 进行无功的分层分区平衡调节, 每调节完一个同层区的无功后都要进行潮流计算。

4) 进行终端变电站的局部电压无功调节, 计算系统潮流, 确定系统最终状态。

2.2 全局电压无功调节

全局电压无功调节过程中, 首先进行全网终端变电站和联络变电站的就地无功平衡调节, 其次进行发电厂和联络变中枢点的逆调压。全局电压无功调节步骤如下:

1) 终端变电站的就地无功调节。

根据终端变电站一次侧的理想功率因数目标, 不计无功调节的功率损耗, 确定最合适的就地无功调节量。

2) 联络变电站的无功调节。

联络变为上级同层区的终端变电站及本级同层区的无功电源, 因此需同时兼顾 2 级同层区的无功需求。考虑上级同层区, 则联络变的一次侧功率因数应满足终端变电站的理想功率因数要求; 考虑本级同层区, 则联络变需要与本级的其他无功电源的输出无功相协调。

为此, 在当前潮流状态基础上, 本文根据联络变电站一次侧的理想功率因数目标, 计算同层区内所有无功电源总的理想无功输出, 并按无功电源输出有功的相同比例对总的理想无功输出进行分摊, 以确定各无功电源的理想无功调节量 ΔQ_{obj} 。考虑联络变无功的最大调节能力, 以最接近 ΔQ_{obj} 的目标来确定联络变电站的无功调节量。

3) 发电机组机端电压的调节。

在当前潮流状态基础上, 根据高压母线的当前电压和逆调压目标值, 考虑升压变的变比影响, 不计电压调节的电压损耗, 确定机端电压调节量。

4) 联络变电站的电压调节。

除无功调节外, 联络变电站还承担中枢点的电压调节任务。

若联络变电站可带负荷调压, 则可通过调节分接头来实现逆调压目标。本文根据中枢点电压的当前值与其理想目标值的差值、电压与变比的灵敏度系数, 采用灵敏度方法^[13-15]确定最合适的变比调节量。

若联络变电站不可带负荷调压, 则只能通过调节无功来实现其中枢点电压的调节。当同层区内超过

总数 2/3 的终端变电站的高压母线都满足电压安全要求时, 则无载联络变电站不需要独立调压; 否则同样采用灵敏度方法使 2/3 的终端变电站高压母线电压满足最低安全要求, 确定无载联络变电站的最小无功调节量。

2.3 无功的分层分区平衡调节

由于发电厂和变电站的电压无功调节能力不一定都足够, 潮流分布也未必均匀, 因此经过全局电压无功调节后, 还可能存在分层分区的无功不平衡问题, 具体表现为: 联络变电站一次侧的分摊无功与其允许无功差别较大, 同层区内发电厂存在无功越限, 同层区无功不平衡。针对上述问题, 本文充分考虑了控制对象的无功不平衡度与其无功调节能力后, 制定了分层分区无功平衡的调节策略。

1) 计算发电厂、终端变电站、联络变电站和同层区的无功不平衡度($\alpha_{G,i}$ 、 $\alpha_{TL,i}$ 和 $\alpha_{A,i}$)。

2) 若所有 $\alpha_{TL,i}=\alpha_{G,i}=0$, 则认为同层区无功平衡满足要求。

3) 若 $\alpha_{A,i}=0$, 则表示可在无功电源之间进行无功协调来满足同层区的无功平衡要求, 而不需要终端变电站参与调节, 此时只需按照无功电源功率因数裕度比例相同原则来确定其无功调节量, 使该同层区内所有的 $\alpha_{TL,i}=\alpha_{G,i}=0$ 。

4) 若 $\alpha_{A,i}>0(<0)$, 则需协调考虑所有控制对象的无功调节能力, 增加感性(容性)无功输出来分摊该同层区的无功不平衡度, 从而实现同层区无功电源的无功平衡。调节原则为: 首先考虑无功电源的无功调节能力, 并必须保证发电厂的无功平衡约束; 其次考虑终端变电站的无功支持, 依次从下层到上层逐层调节同层区的无功平衡, 尽可能缩小调节范围, 尽可能避免造成更多的控制对象无功不平衡。具体策略如下:

①若同层区内所有无功电源的最大无功调节能力总和能满足其无功不平衡度 $\alpha_{A,i}$, 则采用步骤 3) 方法来实现无功电源的无功平衡; 否则计算其缺额, 并以此作为终端变电站的支援无功。

②若同层区所有终端变电站的最大允许无功调节能力总和能满足其支援无功, 则按最大允许无功调节能力的大小排序, 依次以各变电站的最大允许可调无功来确定其无功调节量, 直到满足无功支援的最小要求。

③若同层区所有终端变电站的最大允许无功调节能力总和不能满足其支援无功, 则将允许可调

无功全部投入,同时计算无功支援不足缺额,并将此作为终端变电站的越限支援无功。

④若同层区所有终端变电站的最大无功调节能力总和能够满足其越限支援无功,则按最大无功调节能力的大小排序,依次令每个变电站增加1组无功补偿设备,直至满足无功支援的最小要求。若所有变电站增加1组无功补偿设备后还未满足要求,则继续依次增加第2组、第3组、...,直到满足要求。

⑤若同层区所有终端变电站的最大无功调节能力总和不能满足其越限支援无功,则将可调无功全部投入,并提示该同层区无功调节能力不足,然后停止该同层区的无功调节。

2.4 终端变电站的局部电压与无功调节

在同层区无功调节能力充足的情况下,当全局电压无功调节与分层分区无功平衡调节完成后,可满足无功电源的无功平衡约束及同层区大部分节点的电压安全约束。但由于潮流分布及线路阻抗存在差异,个别终端变电站(不考虑同为负荷与电源的联络变电站)的高压母线电压可能会越限。同时,终端变电站的变比还未调节,其中、低压侧的电压还可能不满足安全约束。

针对上述问题,本文制定了终端变电站电压无功的局部调节策略,其原则为就地调节,不考虑变电站之间的支援,具体策略如下:

1) 终端变电站高压母线电压越限调节。根据节点电压安全约束的最低要求,采用电压无功灵敏度方法确定当前变电站的最小无功调节量。若不能满足其高压母线电压安全约束,则提示该变电站的电压无功调节能力不足,进而停止该变电站的无功调节。

2) 终端变电站中、低压母线电压越限调节。所有局部无功调节完成后,计算系统潮流,并根据当前潮流状态对电压进行局部调节。

若变压器可有载调压,则采用变比调压。调压原则是以中压母线电压的逆调压目标为主,兼顾低压母线的电压安全约束,即以逆调压理想目标电压为基础,不计电压损耗,确定其最接近的变比调节量 Δk 。若变比调节影响低压母线的电压安全,则在满足低压母线电压安全约束的前提下,以 Δk 的改变量最小为目标来确定变比调节量。若变比调节不能同时满足中低压两侧母线电压的安全要求,则以中压侧母线的电压安全调节为主。

若变压器不能带负荷调压,则采用无功调压。同样采用电压无功灵敏度方法,以当前投入无功调节量最小为目标来满足中低压侧母线的电压安全要求,不考虑对高压侧的电压或功率因数的影响。

3 算例分析

3.1 算例参数

本文以43节点系统为例进行仿真,如图2所示。该系统包括1个500 kV 发电厂($G_{1.2}$)、1个500 kV 外部等值电源($G_{1.1}$)、3个500 kV 变电站($T_{1-3.1}$ 、 $T_{1-3.2}$ 、 $T_{1-2.1}$)、2个220 kV 发电厂($G_{3.1}$ 、 $G_{2.1}$)和6个220 kV 变电站($T_{3.1}$ 、 $T_{2.1}$ 、 $T_{2.2}$ 、 $T_{2.3}$ 、 $T_{2.4}$ 、 $T_{2.5}$),其中500 kV 变电站中变压器均为三绕组无载调压变压器,而220 kV 变电站中变压器均为三绕组有载调压变压器。此外,该系统包含1个由线路3-40、41-13、13-5、4-3和变压器 $T_{1-3.2}$ 、 $T_{1-3.1}$ 组成的电磁环网。

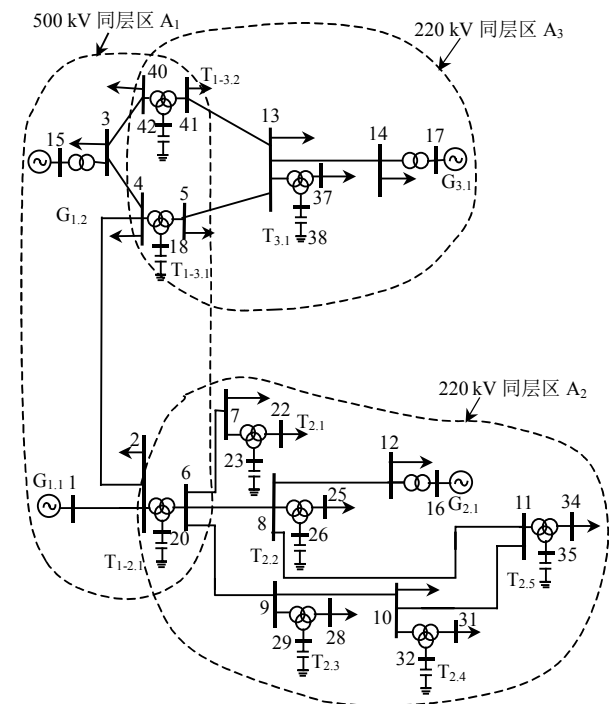


图2 43节点模拟系统及其分区

Fig. 2 A 43-bus simulation system and its partitions

本文构造了3个仿真算例,并与内点法结果进行了对比。算例1在文献[16]的基础上增加了变电站 $T_{1-3.2}$ (其参数与 $T_{1-3.1}$ 相同)、线路3-40和41-13(其参数分别与线路3-4和5-13相同),并增加了节点5、40和41的负荷(其标幺值分别为 $5+j1.2$ 、 $1.6+j0.15$ 、 $4+j1$)。算例2中各负荷点无功增加为算例1的1.2倍,算例3中各负荷点无功增加为算例1的1.4倍。

220 kV及以上、110 kV电压等级节点的电压

合格范围分别为 1.0~1.1 pu、0.97~1.07 pu，发电机节点电压合格范围为 0.95~1.05 pu，其他节点电压合格范围为 0.9~1.1 pu，500、220 kV 变电站一次侧进线功率因数范围为 0.98~1 pu^[17]。

3.2 算例 1

算例 1 仿真结果见表 1。 ψ_B^* 、 ψ_G^* 、 ψ_T^* 分别为电压越限的节点集合、无功越限的发电厂集合、一次侧功率因数越限的变电站集合； ψ_T 为所有变电站集合； Φ 为空集； P_{loss} 为有功网损； S_0 表示初始潮流计算； S_1 表示全局电压无功调节($S_{1.1}$ ~ $S_{1.4}$ 分别对应第 2.2 节中的 4 个阶段)； S_2 表示无功分层分区平衡调节(A_2 、 A_3 分别表示 2 个同层区的无功调节)； S_3 表示终端变电站的局部电压无功调节。

表 1 算例 1 仿真结果
Tab. 1 Simulation result of case 1

调节步骤	调节结果				
	ψ_B^*	ψ_G^*	ψ_T^*	$P_{\text{loss}}/\text{pu}$	
S_0	2~5,7~14,25~27,35~41	$G_{2.1}, G_{3.1}$	ψ_T	0.537 6	
S_1	$S_{1.1}$	3~5,8,10~14,25~27,36~41	Φ	$T_{1.2.1}, T_{1.3.1}, T_{1.3.2}$	0.526 8
	$S_{1.2}$	8,10~12,25~27,36~39	Φ	Φ	0.524 0
	$S_{1.3}$	10,11,25~27,37,38	$G_{2.1}$	$T_{1.3.1}, T_{1.3.2}$	0.517 1
	$S_{1.4}$	10,25,26,38	$G_{2.1}$	$T_{1.3.1}, T_{1.3.2}$	0.508 3
S_2	A_2	10,25,38	Φ	$T_{1.3.1}, T_{1.3.2}$	0.505 9
	A_3	10,25	Φ	Φ	0.504 1
S_3	Φ	Φ	Φ	0.502 7	

由表 1 可知，调节前，部分节点电压不满足安全约束，部分发电厂无功输出越限，所有变电站一次侧功率因数不满足要求。本文方法以各阶段潮流状态特征为基础，分阶段解决了电压无功的主要问题：首先通过全网变电站的就地无功平衡调节使发电厂输出无功和变电站一次侧功率因数基本满足要求(调节步骤 $S_{1.1}$ 和 $S_{1.2}$)，接着通过全局性的中枢纽点电压调节使大部分节点电压满足安全约束(调节步骤 $S_{1.3}$ 和 $S_{1.4}$)，然后通过无功分层分区平衡调节使各同层区无功电源满足无功平衡约束(调节步骤 S_2)，最后通过终端变电站的局部电压无功调节使个别电压越限的节点满足安全约束(调节步骤 S_3)，最终实现了全网的无功平衡和电压合格，同时也说明了厂站电压无功调节能力充足。

本文充分考虑了变电站 $T_{1.3.1}$ 和 $T_{1.3.2}$ 无功补偿量的协调，并很好地实现了无功的就地补偿与分层分区平衡，使 2 变电站的功率因数和枢纽点电压变化一致，从而有效避免了在电磁环网中产生无功环流而增加有功网损和降低电压质量的问题。

本文方法降损效果明显，可将有功网损从

0.537 6 pu 降至 0.502 7 pu，而该算例内点法的有功网损优化结果为 0.502 0 pu。因此，本文方法在厂站电压无功调节能力充足时，降损效果接近了内点法的优化结果。

3.3 算例 2

算例 2 仿真结果见表 2。由表 2 可知，为实现该同层区的无功平衡进而获得系统可行解，同层区 A_2 破坏了个别变电站的功率因数限制，因而同层区 A_2 的最大允许无功调节能力不足。此外，本文方法将有功网损由 0.570 3 pu 降至 0.533 6 pu，降损效果明显，而该算例内点法计算结果不收敛，其结果无任何指导意义。

表 2 算例 2 仿真结果
Tab. 2 Simulation result of case 2

时段	ψ_B^*	ψ_G^*	ψ_T^*	$P_{\text{loss}}/\text{pu}$
调节前	2~14,23~26,34~41	$G_{1.1}, G_{2.1}, G_{3.1}$	ψ_T	0.570 3
调节后	Φ	Φ	$T_{2.1}, T_{2.3}, T_{2.4}$	0.533 6

3.4 算例 3

算例 3 仿真结果见表 3。由表 3 可知，为实现全网无功的基本平衡以及电压的基本合格，同层区 A_2 中所有变电站均破坏了功率因数限制，并导致部分节点电压不满足安全约束，从而得到了系统局部可行解，因而同层区 A_2 的电压无功调节能力不足。此外，本文方法将有功网损从 0.610 5 pu 降至 0.575 2 pu，降损效果明显，而该算例内点法计算结果不收敛，其结果无任何指导意义。

表 3 算例 3 仿真结果
Tab. 3 Simulation result of case 3

时段	ψ_B^*	ψ_G^*	ψ_T^*	$P_{\text{loss}}/\text{pu}$
调节前	2~14,18,19,22~29,32,34~43	ψ_G	ψ_T	0.610 5
调节后	10,11,26	Φ	$T_{2.1} \sim T_{2.5}, T_{1.2.1}$	0.575 2

注： ψ_G 为所有发电机的集合。

4 结论

本文提出了一种有效的输电网络电压无功调节启发式方法，本文方法以潮流计算结果为基础，以全网无功平衡为目标，分层分区分阶段实施电压无功调节，具有良好的实际指导意义。

当厂站电压无功的调节能力充足时，能够通过少数几次潮流计算，实现全网的无功平衡、电压合格和有功网损降低的目标，其降损效果甚至达到了内点法的优化结果，计算速度快，降损效果显著。当局部厂站电压无功调节能力不足时，内点法计算结果不收敛，而本文方法能够实现全网无功基本平衡、电压基本合格和有功网损降低的目标，并能指

出系统的薄弱运行环节。因此本文方法具有较强的实用价值。

致谢

本文得到重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512710204)的资助,特此致谢。

参考文献

- [1] 张勇军, 任霞, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56.
Zhang Yongjun, Ren Zhen, Li Bangfeng. Survey on optimal reactive power dispatch of power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 50-56(in Chinese).
- [2] Chowdhury F D, Crow B H, Acar M L, et al. Improving voltage stability by reactive power reserve management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 338-345.
- [3] 君华. 电力系统无功源配置与分级电压控制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] Ruiz P A, Sauer P W. Voltage and reactive power estimate for contingency analysis using sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 639-647.
- [5] 缪楠林, 刘明波, 赵维兴. 电力系统动态无功优化并行算法及其实现[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 150-157.
Miao Nanlin, Liu Mingbo, Zhao Weixing. Parallel algorithm of dynamic reactive power optimization and its implementation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 150-157(in Chinese).
- [6] Qiu W, Flueck A J, Tu F. A new parallel algorithm for security constrained optimal power flow with a nonlinear interior point method[C]/IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, USA: IEEE, 2005: 447-453.
- [7] 李彩华, 郭志忠, 樊爱军. 原-对偶内点法最优潮流在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(8): 4-7.
Li Caihua, Guo Zhizhong, Fan Aijun. Application of primal-dual interior point method of optimal power flow to power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8): 4-7(in Chinese).
- [8] 徐进东, 丁晓群, 覃振成, 等. 基于非线性预报-校正内点法的电力系统无功优化研究[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 36-40.
Xu Jindong, Ding Xiaqun, Qin Zhencheng, et al. A nonlinear predictor-corrector interior point method for reactive power optimization in power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 36-40(in Chinese).
- [9] 张文, 刘玉田. 自适应粒子群优化算法及其在无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 19-24.
Zhang Wen, Liu Yutian. Adaptive particle swarm optimization and its application in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 19-24(in Chinese).
- [10] 向铁元, 周青山, 李富鹏, 等. 小生境遗传算法在无功优化中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 48-51.
Xiang Tiejuan, Zhou Qingshan, Li Fupeng, et al. Research on niche genetic algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 48-51(in Chinese).
- [11] Le T L, Negnevitsky M. Expert system application for voltage and VAR control in power transmission and distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1392-1397.
- [12] 吕志盛. 输电网络线损率的概率评估方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [13] 张玉珠, 徐文忠, 付红艳. 结合灵敏度分析的变电站电压无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 37-42.
Zhang Yuzhu, Xu Wenzhong, Fu Hongyan. Voltage and reactive power control on global optimization control based on sensitivity [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 37-42(in Chinese).
- [14] 姜新凡, 严庆伟, 周帆, 等. 基于实时灵敏度分析的湖南电网无功电压优化控制系统[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 82-85.
Jiang Xinfan, Yan Qingwei, Zhou Fan, et al. Optimal automatic voltage control system for Hunan provincial power system based on real-time sensitivity analysis[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 82-85(in Chinese).
- [15] 王景亮, 张焰, 王承民, 等. 基于灵敏度分析与最优潮流的电网无功/电压考核方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 65-69.
Wang Jingliang, Zhang Yan, Wang Chengmin, et al. Power system reactive power/voltage assessment based on sensitivity analysis and optimal power flow[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 65-69(in Chinese).
- [16] 程彬. 基于专家经验的电力系统无功优化进化规划算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [17] 电力工业部电力规划设计总院. 电力系统设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 322-323.



颜伟

收稿日期: 2010-07-16。

作者简介:

颜伟(1968), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统优化运行与控制方面的研究, E-mail: cqyanwei@21cn.com;

高强(1984), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统优化运行与控制方面的研究;

余娟(1980), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统无功优化、最优潮流方面的研究;

杜跃明(1968), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行及管理

工作。
(编辑 徐梅)