

# 基于区域无功均分法的环网内变电站关口无功控制

张勇军, 孙舒逸, 刘 轩

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对环网内传统关口无功控制范围无法有效适应系统运行方式变化的问题, 基于无功分层平衡原理, 提出一种区域无功均分法对环网内变电站关口无功控制范围进行差异化整定。该方法首先通过对不同负荷水平下输电线路产生的无功盈余量进行迭代均分, 形成趋优控制条件下的关口无功控制临界值, 然后在考虑全网电压质量合格的前提下对关口无功区间的边界值进行修正, 最终形成适应系统不同运行方式的关口无功差异化控制区间。仿真结果表明, 该方法可有效控制系统运行在最优状态附近, 在不同负荷水平条件下均具有明显的降损效果。

**关键词:** 无功平衡; 区域无功均分法; 变电站; 关口无功; 环网; 趋优控制

**中图分类号:** TM 761

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.016

## 0 引言

基于传统九区图、十七区图等策略的自动电压控制 AVC(Automatic Voltage Control)系统作为提高电压合格率、降低网损、提高系统运行安全性的有效手段和重要措施, 目前在电网中得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。其中, 变电站关口作为不同层级电网之间的连接点, 其无功电压控制关系到上下层电网间无功潮流的分布及电压质量, 对维持不同层级的母线电压和减少电网有功损耗产生重要影响<sup>[5-6]</sup>。

文献[7]对基于九区图的 AVC 策略在不同控制边界下的控制效果进行了对比, 证明关口无功控制范围和负荷水平的改变均会引起网损、调节装置动作次数、调节成本的变化。因此, 针对不同负荷水平, 对关口无功控制范围进行差异化的整定, 是提升系统运行经济性的重要手段。然而, 目前对于关口无功控制范围的调节主要遵循《电力系统电压和无功电力技术导则》(简称《导则》), 对关口无功的控制主要通过控制功率因数实现。如规定 110 kV 高压配电网中, 主变压器最大负荷时其高压侧功率因数应不小于 0.95。该控制方法核心参数一般依据经验确定, 缺乏理论依据的指导。同时由于关口无功控制范围取值没有考虑电网在不同负荷水平下的特性差异, 无法有效适应系统运行方式变化去追求无功优化效果的问题。

为此, 文献[8]指出了不同电压等级电网在不同负荷水平下无功电压特性的差别, 以及关口无功控制范围与电网节能降耗之间的关联特性, 提出一种“定  $\Delta P$  法”对关口无功进行差异化整定, 使网损限

制在最优点附近的一个范围以内, 实现了不同负载率下关口无功的趋优控制, 能够兼顾降损、提高电压质量和减少离散设备调节次数的作用。但该方法仅适合于辐射形电网, 无法直接应用到环网中的变电站关口无功参数整定。

省级电网和地区电网是国内分级调度体制中重要的两级电网, 省地电网协调涉及环网与辐射形网络的结合, 输电线路轻载时无功盈余多而重载时无功损耗大, 线路的无功波动都依赖于变电站和发电厂的无功控制来平衡, 其无功特性和控制方法更加复杂。目前省地电网主要通过电厂、地级电网、省级电网的 AVC 三级控制结构, 以母线电压、关口功率因数等核心参数为主要控制目标, 调整两级电网间的无功分布, 但仍然存在依赖经验、控制手段单一、控制效果欠优化的缺点。

为进一步完善省地电网间的协调运行, 诸多学者进行了大量研究<sup>[9-11]</sup>。文献[12]绘制了省地电网间有功传输量与平均协调功率因数限值间的关系图, 通过迭代获得不同有功传输条件下满足约束条件的关口功率因数; 文献[13]基于灵敏度分析建立扩展约束条件的最优潮流模型, 有效控制关口无功运行在最优状态; 文献[14]引入协调代理作为省调代理和地调代理的中间模块, 以关口无功和关口电压为核心参数, 综合考量省调及地调代理双方提出的控制能力约束和控制需求约束, 生成协调控制策略; 文献[15]基于全联通遍历算法, 对实时电网运行控制对策进行省地联合分析, 自动搜索关口控制薄弱环节, 实现了省地电网的联合决策; 文献[16]在传统二维多区图的基础上, 加入关口电压作为控制要素, 形成三维去失配策略, 在常规、极端运行方式下实现省地电网无功电压调控的优化。

然而, 以上方法仍存在因负荷波动导致控制难

收稿日期: 2016-09-09; 修回日期: 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377060)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377060)

度大<sup>[12]</sup>、涉及计算量巨大的无功优化算法<sup>[13]</sup>、依赖实时信息传输<sup>[14-15]</sup>、控制参数欠优化导致调控失配等问题<sup>[16]</sup>。

为此,本文在分析环网内无功特性的基础上,基于输电线路的无功就地平衡<sup>[17-20]</sup>原则,提出一种区域无功均分法 ARPSM(Area Reactive Power Sharing Method),通过计算不同负荷水平边界值下全网输电线路的总无功盈余量并由各站均摊获得各关口无功控制临界值,实现环网内各变电站关口无功在不同运行方式下的差异化整定。配合九区图等 AVC 策略保证电压控制在合格范围内,具有明显的降损效果。同时,该方法不涉及针对全网的无功优化计算,仅依赖离线数据计算,控制方法更加简单可靠。

### 1 关口无功控制的必要性

将一条输电线路按照单位长度均分为  $n$  段,上层电网以等值电源表示,其  $\pi$  型等值模型如图 1 所示。其中,  $r, x, b$  分别为单位长度输电线路的等效电阻、等效电抗、等效电纳;  $U_{m-1}$  和  $U_m$  为第  $m$  段输电线路的两端电压,  $P_m$  和  $Q_m$  分别为第  $m$  段输电线路的下送有功功率和无功功率,  $m=1, 2, \dots, n$ 。整条输电线路的有功损耗  $\Delta P$  及电压损耗  $\Delta U$  如式(1)所示。

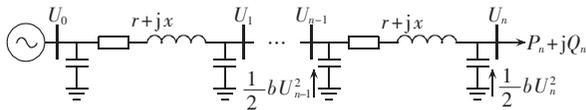


图 1 输电线路等值模型

Fig.1 Equivalent model of transmission line

$$\begin{cases} \Delta P = \sum_{m=1}^n \frac{P_m^2 + \left(Q_m + \frac{1}{2}bU_m^2\right)^2}{U_m^2} r \\ \Delta U = \sum_{m=1}^n (U_{m-1} - U_m) \approx \sum_{m=1}^n \frac{P_m r + \left(Q_m + \frac{1}{2}bU_m^2\right) x}{U_m} \end{cases} \quad (1)$$

定义整条输电线路的无功盈余量  $\Delta Q_L$  如式(2)所示。

$$\Delta Q_L = \sum_{m=1}^n \frac{1}{2}bU_{m-1}^2 + \frac{1}{2}bU_m^2 - \frac{P_m^2 + \left(Q_m + \frac{1}{2}bU_m^2\right)^2}{U_m^2} x \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得,负荷水平较高时,输电线路各点电压  $U_m$  较低,各段输电线路充电功率相对较小,而线路电抗消耗的无功功率大,  $\Delta Q_L$  小甚至为负值;负荷水平较小时,各段输电线路充电功率相对较大,而线路电抗消耗的无功功率小,  $\Delta Q_L$  大。可见,随着负荷水平变化,输电线路将呈现出感性无功盈余或感性无功不足的不同状态。

根据无功就地平衡原理,若输电线路各分段能够自身消纳过剩的无功功率或补偿无功功率不足,则可有效减小整条输电线路内的无功传输量,降低

有功损耗,保证电力系统输电的经济性。然而,线路无法灵活改变自身无功功率,对输电线路的无功平衡只有依赖于变电站中的无功补偿来进行调节。因此,无功平衡很大程度上将表达为关口无功如何随负荷水平的不同整定在不同的水平上。

在此基础上,有专家提出经济压差原理<sup>[21-23]</sup>。该原理指出,当一条输电线路产生的无功盈余量由两端均分时,无功功率分点恰好位于线路中点,即无功功率的传输方向在输电线路中点处发生改变,此时无功功率在电路上对称分布,充电功率与电抗消耗的无功功率差等于两端下送的无功功率之和,线路有功损耗最小,线路运行在最优状态。

可见,电网通过关口无功的合理整定,可以实现电网的无功分层平衡,即本层电网消纳自身产生的无功盈余量或补偿无功缺额,无需上下层电网提供跨层级的无功支撑,进而达到电网无功潮流最小化、有功损耗最小化和电压分布合理化的效果。

对辐射形电网,可通过解耦得到多条相互独立的输电线路单元,根据经济压差原理或无功优化计算,易得关口无功整定范围。然而对于环网,其网架结构及潮流分布复杂,各变电站耦合关系密切,单独变电站的关口无功受多条输电线路共同影响,而一个变电站的关口无功变化也会对其他变电站的关口无功产生影响。因此,对环网内变电站的关口无功的整定难度更大。

### 2 ARPSM

由于目前在我国的受端系统中不含大型发电厂的情况仍较为常见,因此本文重点关注不含发电厂的环网。

对于如图 2 所示的由  $N_S$  座变电站及  $N_L$  条输电线路组成的环网,定义第  $i$  座变电站的关口无功  $Q_{Hi}$  如式(3)所示。

$$Q_{Hi} = \sum_{l=1}^{N_i} Q_{Hil} \quad (3)$$

其中,  $N_i$  为第  $i$  座变电站内主变数量,  $Q_{Hil}$  为第  $i$  座

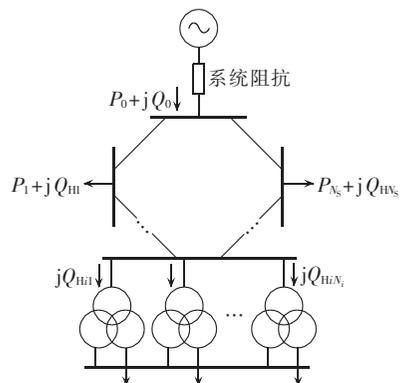


图 2 环网拓扑结构图

Fig.2 Topological structure of loop network

变电站内第  $l$  台主变高压侧下送的无功功率,且  $l=1, 2, \dots, N_l, i=1, 2, \dots, N_s$ 。

通过控制各变电站主变低压侧的无功补偿装置、调节主变档位可改变各站关口无功,理论上必然存在某个运行状态,使得每条输电线路的功率分点均位于各自中点附近,满足或近似满足第 1 节所述的最优运行状态,全网有功损耗趋于最小化。

然而,寻找每条输电线路最优的运行状态涉及复杂的无功优化算法,不能严格保证收敛性,计算复杂且随不同运行方式改变的灵活性低。此外,将运行状态控制在某个最优点可能导致无功补偿装置的频繁投切。

为此,本方法的核心思想在于通过控制环网内变电站关口无功使全网运行在最优状态附近的区间内,即趋优运行状态,可避免无功优化引起的复杂问题,同时实现近似优化的降损效果。

定义环网内输电线路产生的总无功盈余量  $\Delta Q_{l\Sigma}$  如式(4)所示。

$$\Delta Q_{l\Sigma} = \sum_{k=1}^{N_l} \Delta Q_{l\Sigma k} \quad (4)$$

其中,  $\Delta Q_{l\Sigma k} (k=1, 2, \dots, N_l)$  为每条输电线路产生的无功盈余量。

环网内变电站的趋优运行状态应是本层电网不进行跨层级的长距离无功传输。ARPSM 是基于无功分层平衡原理,当  $\Delta Q_{l\Sigma}$  由各变电站等量均分,即关口无功满足式(5),此时无功分布如图 3 所示,本层电网的无功需求直接由本层电网提供,无需上层电网提供自上而下的长距离全额传输,无功传输距离减小,可有效降低输电线路上的有功损耗。

$$Q_{Hi} = \frac{\Delta Q_{l\Sigma}}{N_s + 1} \quad (5)$$

其中,“1”表示区域电网计算中的平衡节点,即等值电源所连母线。当  $\Delta Q_{l\Sigma}$  为正即输电线路出现无功过剩时,需要各变电站由高压侧向中压侧和低压侧下送无功功率,此时  $Q_{Hi}$  为正值;当  $\Delta Q_{l\Sigma}$  为负即输电线路出现无功损耗时,需要各变电站由中压侧和低压侧向高压侧倒送无功功率,此时  $Q_{Hi}$  为负值。

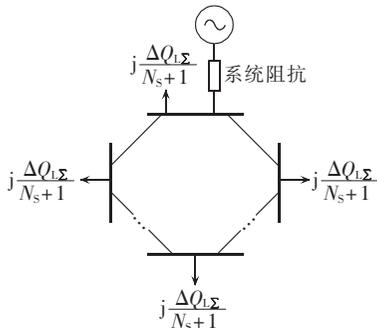


图 3 满足 ARPSM 的无功分布

Fig.3 Reactive power distribution based on ARPSM

但关口无功的改变会重新影响环网的无功潮流分布,线路充电功率及无功损耗随之发生改变,从而导致均分前后的  $\Delta Q_{l\Sigma}$  产生差异。对大多数无功潮流分布,通过一次直接均分实际上仅能完成对  $\Delta Q_{l\Sigma}$  的近似等量分配,并不能完全达到图 3 所示状态。因此,  $\Delta Q_{l\Sigma}$  需要采用迭代均分进行完善,以保证 ARPSM 的均分精度。

基于迭代均分的 ARPSM 如图 4 所示。其中,  $p$  为迭代次数;  $\varepsilon$  为收敛精度。第  $p$  次迭代时,设置第  $i$  座变电站的高压侧等值有功负荷及等值无功负荷分别为  $P_{ip}, Q_{ip}$ 。经过  $p$  次迭代后的输电线路总无功盈余量为  $\Delta Q_{l\Sigma p}$ ,各变电站的关口无功控制值为  $Q_{Hip}$ 。此外,  $Q_{Op}$  为经过  $p$  次迭代后本层电网与平衡节点交换的无功功率,其值为正表示本层电网向平衡节点倒送无功功率,其值为负表示平衡节点向本层电网下送无功功率。此时,在极小的精度误差范围内,无功潮流分布与图 3 完全匹配,真正达到无功盈余量的等量均分,满足无功分层平衡原理。因此,可认为在初始潮流状态下,控制关口无功为  $Q_{Hip}$  时,符合趋优控制要求,达到有效降损的目的。

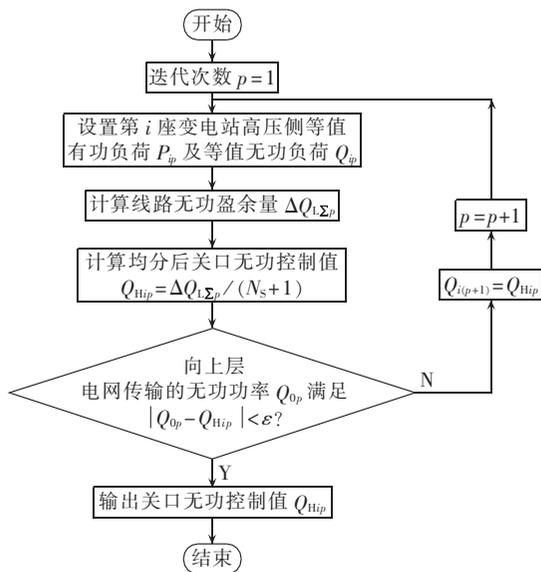


图 4 基于迭代均分的 ARPSM

Fig.4 ARPSM based on iterative sharing

### 3 关口无功控制范围差异化整定

#### 3.1 变化负荷水平下 ARPSM 的应用

由于电网内的潮流分布是时刻变化的,输电线路的无功盈余量及电压水平都与负荷水平具有密切关系。单一的关口无功控制值仅在特定的初始潮流状态下有趋优效果,无法有效适应负荷水平的变化。此外,由于关口无功的调节措施多为离散调节,严格控制关口无功到某个定值一般情况下是不能做到的,还可能引起调节装置的频繁动作。

ARPSM 是将单一的关口无功控制值扩展为适应不同负荷水平的关口无功控制范围,实现环网内变电站关口无功的差异化控制。因此,探究不同负荷水平下环网的无功分布特性及电压特性具有必要性。

定义各站负载率  $\beta_i$  及全网平均负载率  $\beta_{av}$  如式(6)所示。

$$\begin{cases} \beta_i = P_i / S_{Ni} \\ \beta_{av} = \left( \sum_{i=1}^{N_s} P_i \right) / \left( \sum_{i=1}^{N_s} S_{Ni} \right) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $S_{Ni}$  为第  $i$  座变电站变电容量。

定义变电站高压侧母线平均电压  $U_H$  如式(7)所示。

$$U_H = \sum_{i=1}^{N_s} U_{Hi} / N_s \quad (7)$$

其中,  $U_{Hi}$  为第  $i$  座变电站高压侧母线电压。

$\beta_{av}$  表征全网的平均负荷水平,而根据实际运行状况,同一片区内相同电压等级的变电站在同一时刻的  $\beta_i$  一般不会有显著差异,因此,为简化方便,在此假设各变电站负载率  $\beta_i = \beta_{av}$ ,用于环网内无功特性分析。

如图 5 所示,对于给定的环网,  $\beta_{av}$  与  $U_H, \Delta Q_{L\Sigma}$  均存在严格的单调负相关关系。

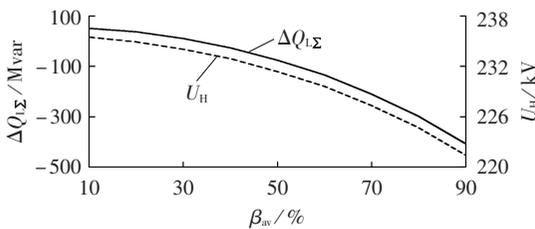


图 5  $U_H, \Delta Q_{L\Sigma}$  与  $\beta_{av}$  的关系

Fig.5 Curves of  $U_H$  and  $\Delta Q_{L\Sigma}$  vs.  $\beta_{av}$

本方法将  $\beta_{av}$  划分为  $q-1$  个负荷水平,定义  $\beta_{av} = \beta_j$  和  $\beta_{av} = \beta_{j+1}$  分别为负荷水平边界  $j$  和  $j+1$ ,则共有  $q$  个负荷水平边界。

在负荷水平边界  $j(j=1, 2, \dots, q)$  下采用 ARPSM。为使初始潮流状态尽量接近趋优状态以减少迭代次数,因此设置第  $i$  座变电站初始的高压侧等值有功负荷  $P_{ij}$  及等值无功负荷  $Q_{ij1}$  如式(8)所示。

$$\begin{cases} P_{ij} = \beta_j S_{Ni} \\ Q_{ij1} = 0 \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N_s; j=1, 2, \dots, q \quad (8)$$

按照 ARPSM 进行迭代均分,可得经过  $p$  次迭代达到收敛条件时,负荷水平边界  $j$  下的输电线路无功盈余量  $\Delta Q_{L\Sigma jp}$  及各变电站关口无功控制值  $Q_{Hijp}$ 。

定义负荷水平边界  $j$  下的关口无功控制临界值  $Q_{Mj}$  如式(9)所示。

$$Q_{Mj} = Q_{Hijp} \quad (9)$$

基于  $\beta_{av}, \Delta Q_{L\Sigma}, Q_{Hi}$  两两间的单调关系,各负荷水平边界下的  $\beta_{av}, \Delta Q_{L\Sigma}, Q_{Hi}$  满足图 6 所示的一一映射

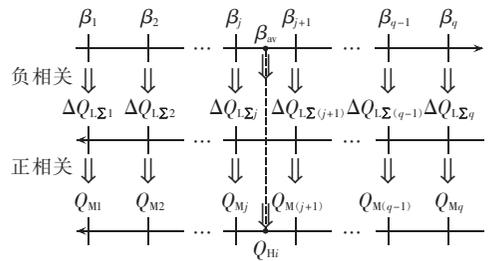


图 6 负荷水平边界下  $\beta_{av}, \Delta Q_{L\Sigma}, Q_{Hi}$  的映射关系

Fig.6 Mapping relationship among  $\beta_{av}, \Delta Q_{L\Sigma}$  and  $Q_{Hi}$  for different load level boundaries

关系。

可见,  $\forall \beta_{av} \in [\beta_j, \beta_{j+1}]$ ,按照 ARPSM 得到的  $Q_{Hi}$  必然满足  $Q_{Hi} \in [Q_{Mj}, Q_{M(j+1)}]$ 。因此,对于该负荷水平,将关口无功控制区间整定为  $[Q_{Mj}, Q_{M(j+1)}]$  可起到趋优的降损效果。

此外,在负荷较重,即  $U_H, \Delta Q_{L\Sigma}$  较小甚至  $\Delta Q_{L\Sigma}$  为负时,ARPSM 通过减小关口无功下送或由各变电站倒送无功,起到抬高  $U_H$  的作用;在负荷较轻或下层电网无功倒送时,  $U_H, \Delta Q_{L\Sigma}$  较大,ARPSM 通过各变电站分摊  $\Delta Q_{L\Sigma}$  并增大关口无功下送量,起到降低  $U_H$  的作用。因此,得到的关口无功控制区间除了具有趋优降损效果,同时可以维持  $U_H$  稳定运行在合格范围内。

### 3.2 关口无功控制范围整定

由于关口无功控制主要通过投切补偿电容器实现,其调节方式离散且依赖于补偿电容器单组容量限制。当控制区间  $[Q_{Mj}, Q_{M(j+1)}]$  的跨度过大,表明该控制范围粗糙,趋优效果不明显,此时本方法将控制区间进一步划分为多个子区间,提高控制精度;若跨度过小,如小于补偿电容器单组容量,则可能在调节过程中导致关口无功无法落入区间内,此时本方法在不改变降损效果的前提下,对控制区间边界进行合理扩展。另外,在负荷水平较轻时,由于无功盈余量大,为保证无功功率不出现倒送,本方法适当缩小了控制范围以保证电压质量。

定义控制区间跨度为  $\Delta Q_R$ ,并定义补偿电容器最大单组容量为  $Q_c$ 。依据工程实际经验,为避免补偿电容器的频繁投切,  $\Delta Q_R$  一般设置为  $Q_c$  的 2~3 倍。

为进一步避免调节措施的频繁动作并改善电压质量,对负荷水平边界  $j$  及  $j+1$  限定的负荷水平下,关口无功控制范围按图 7 进行整定。

可见,基于 ARPSM 的关口无功差异化整定方法,不仅在理论上以节能降损的趋优状态为主要目标,同时还充分考虑到实际操作中可能遇到的调节装置频繁动作问题及电压质量问题。最终得到的关口无功控制区间兼顾无功控制和电压调节能力,是在结合实际情况基础上对理论结果的进一步调整,具有切合实际的应用价值。

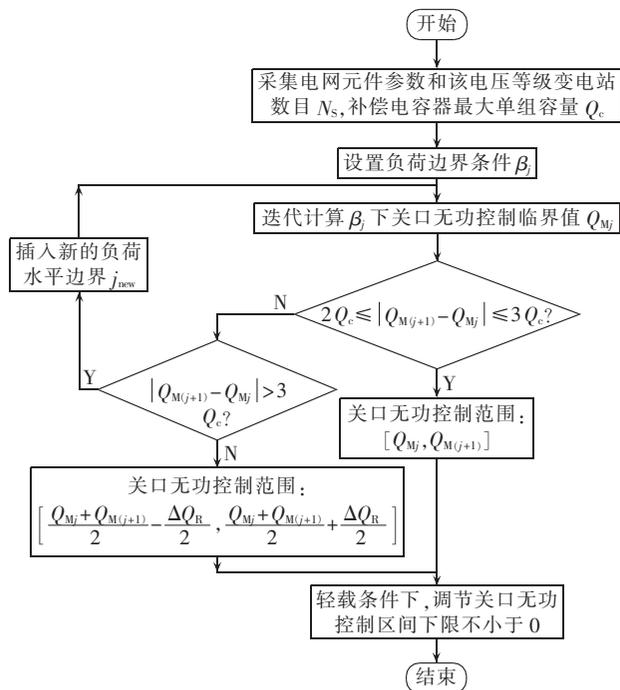


图 7 关口无功控制区间整定流程图

Fig.7 Flowchart of setting for reactive power control range of gateway

### 4 算例及其应用分析

在工程实际中,环网中平均负载率  $\beta_{av}$  一般分布在 10%~70%,因此本文选择将负荷水平 10%~70% 划分为轻载、中载、重载 3 类,环网内各变电站统一负载率  $\beta_i = \beta_j$  分别为 10%、30%、50%、70%,其中  $j = 1, 2, 3, 4$ ,以这 4 种负荷水平分别代表轻载下边界、轻载与中载边界、中载与重载边界、重载上边界,依次命名为负荷水平边界 1—4。实际控制过程中,负载率低于 10% 的可以同样按轻载的参数进行控制,而高于 70% 的可以按重载的参数进行控制。

以广东省某片区 220 kV 电网为例,图 8 给出了该区域电网接线方式的拓扑结构,片区内共有 220 kV 变电站 6 座,上层 500 kV 变电站以等值电源表示。220 kV 变电站 A1—A6 对应主变容量见表 1。

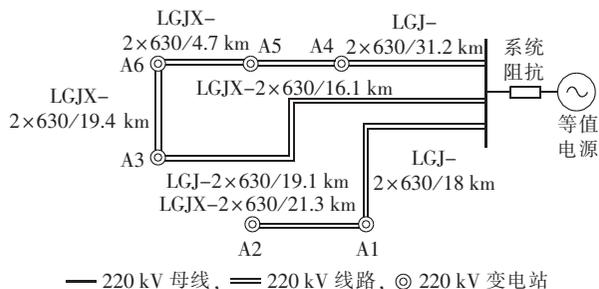


图 8 某 220 kV 片区电网

Fig.8 A 220 kV regional network

根据 ARPMs,设置迭代收敛精度为  $\varepsilon = 0.1$  Mvar,经过  $p$  次迭代后对应的输电线路无功盈余量  $\Delta Q_{i\Sigma jp}$

表 1 各变电站主变容量

Table 1 Capacity of main transformer for each substation

变电站	容量/(MV·A)	变电站	容量/(MV·A)
A1	240×3	A4	240×4
A2	150×3+180	A5	240×3
A3	240×4	A6	240×3

及关口无功控制临界值  $Q_{Mj}$  如表 2 所示。

表 2 输电线路  $\Delta Q_{i\Sigma jp}$  及  $Q_{Mj}$

Table 2  $\Delta Q_{i\Sigma jp}$  and  $Q_{Mj}$  of transmission lines

$\beta_{av}/\%$	$\Delta Q_{i\Sigma jp}/\text{Mvar}$	$Q_{Mj}/\text{Mvar}$
10	50.82	7.26
30	10.36	1.48
50	-72.24	-10.32
70	-200.06	-28.58

补偿电容器最大单组容量  $Q_c = 10$  Mvar,在此设置  $\Delta Q_R = 20$  Mvar。可见,表 2 中不同负荷水平下的  $Q_{Mj}$  和  $Q_{M(j+1)}$  均满足  $|Q_{M(j+1)} - Q_{Mj}| < 2Q_c$ ,表明各负荷水平下  $[Q_{Mj}, Q_{M(j+1)}]$  的区间跨度均偏小。按照第 3.2 节所示方法对不同负荷水平的区间边界值进行调整,可得电网在轻载、中载、重载下的关口无功控制范围如表 3 所示。

表 3 不同负荷水平下的关口无功控制范围

Table 3 Reactive power control range of gateway for different load levels

负荷水平	关口无功控制范围/Mvar
10% < $\beta_{av}$ < 30% (轻载)	[0, 14]
30% ≤ $\beta_{av}$ ≤ 50% (中载)	[-15, 5]
50% < $\beta_{av}$ < 70% (重载)	[-30, -10]

选取某典型日 24 个时刻点的连续断面进行仿真验证,各主变中压侧及低压侧负荷均等效至高压侧母线,各时刻全网总有功负荷及总无功负荷如图 9 所示。

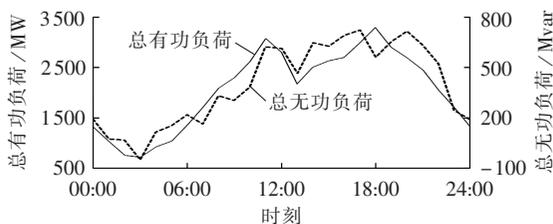


图 9 全网有功负荷及无功负荷

Fig.9 Active and reactive loads of whole network

为了比较本文控制方法和无功优化方法及不考虑无功补偿投切的运行状态的效果,这里对表 4 所示的 5 种运行状态进行对比。

该电网某日 24 h 内各断面  $P_{LOSS0}$ 、 $P_{min}$ 、 $P_{LOSS1}$ 、 $P_{LOSS2}$ 、 $P_{LOSS3}$  的值如图 10 所示。

由图 10 可见,  $P_{LOSS1}$ 、 $P_{LOSS2}$ 、 $P_{LOSS3}$  曲线均接近于  $P_{min}$  曲线且明显低于  $P_{LOSS0}$  曲线,表明由本文提出的关口无功控制范围,其降损效果明显且接近最优控制

表 4 5 种运行状态对比

Table 4 Comparison among five operating conditions

序号	状态	环网总有功损耗
1	无电容器投入(初始)	$P_{LOSS}$
2	无功潮流分布最优(最优化)	$P_{min}$
3	各站关口无功均控制在表 3 区间上限值	$P_{LOSS1}$
4	各站关口无功均控制在表 3 区间中值	$P_{LOSS2}$
5	各站关口无功均控制在表 3 区间下限值	$P_{LOSS3}$

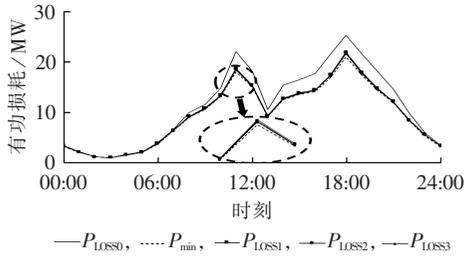


图 10 状态 1—5 全网有功损耗

Fig.10 Active power loss of whole network for five operating conditions

状态(即状态 2)。与无功优化控制相比,本控制方法只需一次性离线整定,无需实时进行算法复杂的无功优化计算。此外,上述计算中无功优化是假定无功补偿连续性的前提下得到的,而本方法考虑了无功补偿装置的离散性,因此在工程实际中的应用性更强。

为进一步检验上述关口无功控制范围的有效性,本文选取 3 种关口无功控制方法进行对比,如表 5 所示。

表 5 3 种关口无功控制方法对比

Table 5 Comparison among three gateway reactive power control methods

序号	方法	无功控制范围/Mvar		
		轻载	中载	重载
1	ARPSM	[0, 14]	[-15, 5]	[-30, -10]
2	固定控制区间	[-20, 20]	[-20, 20]	[-20, 20]
3	关口功率因数	[0.9, 0.94]	[0.94, 0.96]	[0.96, 1]

仍以图 9 所示的典型日连续断面作为初始状态。定义关口无功控制方法  $z$  的平均降损率及平均电压分别为  $\eta_{z,avg}$ 、 $U_{z,avg}$ , 分别用以表示该控制方法下的降损效果及电压水平:

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_{z,avg} &= \sum_{y=1}^3 \eta_{zy} / 3 \\ \eta_{zy} &= \frac{P_{LOSS0} - P_{LOSSzy}}{P_{LOSS0}} \times 100\% \\ U_{z,avg} &= \sum_{y=1}^3 U_{Hz,y} / 3 \\ U_{Hz,y} &= \sum_{i=1}^{N_k} U_{Hz,yi} / N_s \end{aligned} \right. \quad (10)$$

其中,  $z=1, 2, 3$  对应 3 种关口无功控制方法;  $P_{LOSSzy}$ 、 $\eta_{zy}$ 、 $U_{Hz,yi}$ 、 $U_{Hz,y}$  分别为将关口无功控制在区间上限、中值、下限(依次对应  $y=1, 2, 3$ )时的环网有功损耗、降损率、各变电站高压侧母线电压、高压侧母线平均

电压。

记初始状态下高压侧母线平均电压为  $U_{H0}$ , 对比 3 种控制方法下的  $\eta_{z,avg}$ 、 $U_{z,avg}$  分别如图 11 和图 12 所示,图 12 中平均电压为标么值。

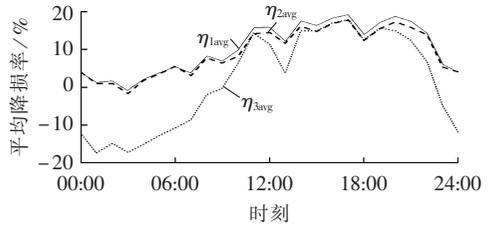


图 11 平均降损率对比

Fig.11 Comparison of average loss reduction rate

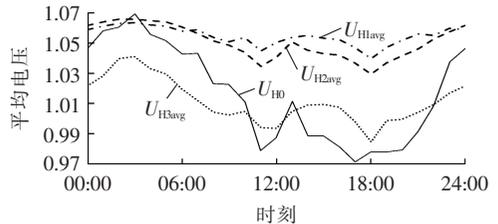


图 12 平均电压对比

Fig.12 Comparison of average voltage

图 11 中  $\eta_{z,avg}$  为负表示全网有功损耗较初始状态有所上升,这是由于在负荷水平较轻时,为保证电压质量,需限制关口无功不向上层电网倒送,此时可能牺牲部分降损效果。从图 11 中可以看出,相比于方法 3,依据方法 1 可以在不同负荷水平下获得更好的降损效果,出现网损升高的时刻点也由 11 个下降为 1 个;相比于方法 2,由于考虑了负荷水平变化对关口无功的影响,方法 1 的控制区间划分更加精细,对不同运行状况的适应能力更强,降损效果更好,重载时的降损幅度最高可提升 1.66%,在  $\eta_{z,avg}$  为负时,其网损增量也更小。

根据《导则》,220 kV 母线电压应满足的偏差范围为  $-3\% \sim 7\%$ 。由图 12 可见,初始状态下,该 220 kV 环网的母线电压波动较大,在轻载条件下由于无功倒送,导致平均电压达到上限;在重载条件下由于负荷水平重,导致平均电压接近下限。3 种控制方法均在平均电压达到或接近极限时将其调节入合格范围内,且均距离电压极限值保留了一定的调节裕度,但方法 1 的电压波动最小,表明本文提出的关口无功控制方法除了保证母线电压的安全性,还能更有效地维持电压的稳定性。

综上所述,根据本文得到的关口无功控制范围在不同负荷水平下均可以有效控制系统运行在最优点附近,且具有更好的降损效果。同时,该控制范围在不同负荷水平下起到维持高压侧母线电压安全性和稳定性的作用。

## 5 结论

本文基于无功就地平衡原理提出适用于环网的 ARPSM 用以对变电站关口无功进行差异化控制,通过各站均分输电线路产生的无功盈余量,实现环网内的无功分层平衡,具体结论如下:

**a.** ARPSM 通过各站均分无功盈余量获取关口无功控制临界值,简化了寻找最优运行状态的复杂计算过程;

**b.** ARPSM 考虑了电网运行特性变化对关口无功控制的影响,能够针对不同的负荷水平制定出相适应的关口无功控制范围,在不同负荷水平下均使系统运行在最优附近,具有明显的降损效果;

**c.** ARPSM 得到的关口无功控制范围兼顾了高压侧母线电压安全性和稳定性,充分保证电压质量,具有实际的工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] ALIMISIS V, TAYLOR P C. Zoning evaluation for improved coordinated automatic voltage control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2736-2746.
- [2] 乔颖, 陈惠粉, 鲁宗相, 等. 双馈风电场自动电压控制系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 15-22.  
QIAO Ying, CHEN Huifen, LU Zongxiang, et al. Design and application of automatic voltage control system in doubly-fed induction generator wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 15-22.
- [3] 于汀, 蒲天骄, 刘广一, 等. 含大规模风电的电网 AVC 研究与應用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 81-86.  
YU Ting, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. AVC research and application for grid with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 81-86.
- [4] 徐箭, 袁志昌, 汪龙龙, 等. 参与 AVC 调节的 STATCOM 电压控制策略设计与仿真[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 115-120.  
XU Jian, YUAN Zhichang, WANG Longlong, et al. Design and simulation of voltage control strategies for STATCOM participating in AVC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 115-120.
- [5] 张锡填. 广东电网无功电压调控的典型问题及对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
ZHANG Xitian. The typical problems and solutions on volt/var control of Guangdong Power Grids[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [6] 季玉琦, 耿光飞, 温渤翼. 含分布式电源的配电网电压无功两级协调控制模式[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1243-1248.  
JI Yuqi, GENG Guangfei, WEN Boying. Two-level coordinated voltage and reactive power control with distributed generation in distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1243-1248.
- [7] ZHONG Hongmei, LIU Lun, ZHANG Yongjun, et al. Research on optimization setting of reactive power interval based on nine-area figure strategy[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014 IEEE PES Asia-Pacific. Hong Kong, China: IEEE, 2014: 1-5.
- [8] 张勇军, 羿应棋, 陈艳, 等. 110 kV 变电站关口无功区间差异化整定方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 1-8.  
ZHANG Yongjun, YI Yingqi, CHEN Yan, et al. A differential setting method for gateway reactive power interval of 110 kV substation[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(12): 1-8.
- [9] 吴涵, 陈彬, 管霖, 等. 供电可靠性提升措施优选的量化评价方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 126-130.  
WU Han, CHEN Bin, GUAN Lin, et al. Quantitative evaluation and optimized selection of power supply reliability enhancement measures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 126-130.
- [10] 魏昊焜, 刘健, 高慧. 分布式电源的本地电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 40-45.  
WEI Haokun, LIU Jian, GAO Hui. Local voltage control of distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 40-45.
- [11] 黄小庆, 阮驰骋, 邹佳芯, 等. 考虑电网特性的动态无功优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 127-133.  
HUANG Xiaoqing, RUAN Chicheng, ZOU Jiixin, et al. Optimal dynamic var configuration considering grid characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 127-133.
- [12] 张勇军, 张锡填, 苏杰和. 基于 AVC 系统的省地电网关口无功功率协调控制方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2771-2777.  
ZHANG Yongjun, ZHANG Xitian, SU Jiehe. An AVC system based coordinated control method for reactive power at gateway between provincial and regional power grids[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2771-2777.
- [13] 邹根华, 郭玉金, 姚诸香, 等. 省地协调自动电压控制(AVC)实现方法的研究[J]. 中国电力, 2008, 41(12): 6-9.  
ZOU Genhua, GUO Yujin, YAO Zhuxiang, et al. An implementation scheme of coordinated automatic voltage control for provincial power networks[J]. Electric Power, 2008, 41(12): 6-9.
- [14] 王彬, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 双向互动的省地协调电压控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 57-63.  
WANG Bin, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Bidirectional-interaction based voltage control system by coordination between provincial and district power networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 57-63.
- [15] 汤伟, 刘辉, 刘路登, 等. 省地电网协同运行策略与实践[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 154-160.  
TANG Wei, LIU Hui, LIU Ludeng, et al. Strategy and practice of cooperative operation of province and city power grid[J]. Electric Power, 2015, 48(12): 154-160.
- [16] 张勇军, 张豪, 唐捷. 小方式下省地电网无功电压调控的去失配策略[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 144-149.  
ZHANG Yongjun, ZHANG Hao, TANG Jie. Antimismatch strategy for volt/reactive power control between provincial and district power networks under light load flow mode[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 144-149.
- [17] BAROT H, BHATTACHARYA K. Optimal reactive power planning and compensation effects on transmission loss components[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa, USA: IEEE, 2007: 1-7.
- [18] VICTOROVNA S N, VICTOROVICH M Y, VICTOROVNA K Y. Optimal compensation of reactive power in distribution nets as means of voltage regulation[C]//Electrical Power Quality and Utilisation. Lodz, Poland: IEEE, 2009: 1-6.

- [19] 颜伟,高峰,王芳,等. 考虑区域负荷无功裕度的无功电压优化分区方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(2):61-66.  
YAN Wei,GAO Feng,WANG Fang,et al. An optimal network partitioning algorithm for reactive power and voltage control considering regional reactive power margin[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(2):61-66.
- [20] 戴武昌,陈东魁,张威,等. 大容量远距离交流输电系统无功平衡及稳态电压控制[J]. 电网技术,2013,37(4):1101-1105.  
DAI Wuchang,CHEN Dongkui,ZHANG Wei,et al. Reactive power balance and steady voltage control of large-scale long-distance AC transmission system[J]. Power System Technology, 2013,37(4):1101-1105.
- [21] 唐晓骏,陈会员,姚淑玲,等. 基于改进经济压差的特高压电网无功电压控制策略[J]. 电网技术,2013,37(3):673-678.  
TANG Xiaojun,CHEN Huiyuan,YAO Shuling,et al. Reactive power and voltage control strategy for UHVAC power grid based on improved economic voltage difference[J]. Power System Technology,2013,37(3):673-678.
- [22] 钱峰,邓健超,汤广福,等. 利用经济压差确定动态无功补偿容量的方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(1):1-6.  
QIAN Feng,DENG Jianchao,TANG Guangfu,et al. New ap-

proach to determine capacity of dynamic reactive power compensation using economic voltage difference[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(1):1-6.

- [23] 唐寅生,李碧君. 电力系统 OPF 全网最优无功的经济压差  $\Delta U$  算法及其应用[J]. 中国电力,2000,33(9):42-44.  
TANG Yinsheng,LI Bijun. Economic voltage difference algorithm and its application for optimal reactive power flow[J]. Electric Power,2000,33(9):42-44.

#### 作者简介:



张勇军

张勇军(1973—),男,广东河源人,教授,博士研究生导师,博士,从事能源互联网、主动配电网、无功电压控制、可靠性与规划等研究工作(E-mail:zhangjun@scut.edu.cn);

孙舒逸(1992—),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统无功与电压控制(E-mail:329416346@qq.com);

刘轩(1993—),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为电力系统无功优化规划(E-mail:liuxuan\_scut@qq.com)。

## Reactive power control based on ARPSM for substation gateway in loop network

ZHANG Yongjun,SUN Shuyi,LIU Xuan

(School of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

**Abstract:** Since the traditional reactive power control range of gateway in loop network cannot adapt effectively to the change of system operating mode,the ARPSM(Area Reactive Power Sharing Method) based on the principle of hierarchical reactive power balance is proposed to differentially set the reactive power control range of gateway in loop network,which shares the reactive power surpluses produced by the transmission lines at different load levels iteratively to obtain the critical value of reactive power control of gateway in the optimizing control condition and then,while the voltage quality of entire network is guaranteed,revises the boundary of reactive power range of gateway to set differential reactive power control range of gateway for adapting to different system operating modes. Simulative results show that,the proposed method effectively controls the system operation near the optimal condition and significantly reduce the power loss at different load levels.

**Key words:** reactive power balance; ARPSM; electric substations; reactive power of gateway; loop network; optimizing control