

# 自动电压控制下的地区电网电压无功运行状态评估指标体系

林捷<sup>1</sup>, 王云柳<sup>2</sup>, 黄辉<sup>1</sup>, 陈少怀<sup>1</sup>, 蔡安铭<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司汕头供电局, 广东 汕头 515041;  
2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 为从电压无功协调控制角度评估地区电网的电压无功运行状态, 并量化造成运行状态不佳的原因, 针对采用自动电压控制的地区电网, 提出了一套电压无功运行状态评估指标体系。该指标体系以电网实际量测值为基础数据, 基于地区电网的电压无功考核标准和控制策略, 构建出三类评估指标: 区域电源母线电压合格程度及其不合格原因评估指标、区域关口无功合格程度及其不合格原因评估指标、区域负荷无功平衡程度及其不平衡原因评估指标。通过对广东汕头地区电网的电压无功运行状态进行评估, 验证了所提指标的正确性和有效性。所得结果可为地区电网运行参数设置、控制策略优化和无功补偿设备配置提供建议。

**关键词:** 地区电网; 自动电压控制; 电压无功控制; 协调性; 评估指标

## An index system for voltage and reactive power operation status evaluation in regional power grid under automatic voltage control

LIN Jie<sup>1</sup>, WANG Yunliu<sup>2</sup>, HUANG Hui<sup>1</sup>, CHEN Shaohuai<sup>1</sup>, CAI Anming<sup>1</sup>

(1. Shantou Power Supply Bureau, China Southern Power Grid, Shantou 515041, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To evaluate the voltage and reactive power operating status of the regional power grid in the sight of harmony, and give the quantified reason for the operating status not good, an evaluation index system for voltage and reactive power operating status of regional power grid under automatic voltage control (AVC) is proposed. According to the power system measured data, the index system is indicated based on the voltage and reactive power evaluation criteria and AVC control strategy of the regional power grid. The proposed index system includes area power supply bus voltage qualification degree and disqualification reason evaluation index, area gateway reactive power qualification degree and disqualification reason evaluation index, area load reactive power balance level and unbalance reason evaluation index. To verify the rationality and validity of the proposed index system, the evaluation analysis results of the power grid in Shantou of Guangdong Province are given. The assessment results can give some suggestions on the AVC operation parameter set, control strategy optimization, and reactive power compensation planning of the regional power grid.

**Key words:** regional power grid; automatic voltage control; voltage/reactive power control; harmony; evaluation index

## 0 引言

近年来, 智能电网技术高速发展, 为在电力系统安全稳定运行的前提下, 确保区域电压高水平运行, 并尽量实现区域无功的分层分区就地平衡, 国内多家地区调度主站采用自动电压控制(Automatic voltage control, AVC)系统实现地区电网电压无功的

协调控制<sup>[1-4]</sup>。

地区调度主站 AVC 系统采用无功优化确定各子区域中枢点电压控制目标时, 调压设备能力限制会影响无功优化效果, 地调测量系统较弱、调压设备闭锁等问题会使中枢点电压无法准确跟踪控制目标, 从而导致地区电网电压无功合格性和运行经济性较低这两类问题<sup>[5-7]</sup>。首先, 为使电压无功运行状态满足合格性要求, 当区域电压普遍偏低(高)时, 需协调区域枢纽厂站电压无功控制设备, 以尽可能

实现区域电压合格程度最大化,避免控制设备振荡调节;当区域关口无功不合格时,需协调整个区域内的无功补偿装置以满足关口功率因数的考核要求。其次,为提升电网运行经济性,AVC应尽量实现区域间无功分区平衡,区域内无功分层平衡,各厂站无功就地平衡。综上两点,如何精细化评估自动电压控制下地区电网电压无功运行的合格性和经济性,追踪并量化造成不合格和不经济的原因,并以此为依据调整AVC运行参数、进行控制策略优化和补偿容量配置已成为一个亟待解决的关键问题。

为评估电网的电压无功运行状态,现有研究成果针对不同对象建立了相应的导则和评估指标体系。现有电压无功导则和规定<sup>[8-10]</sup>明确了各级电压和功率因数的合格范围,由此可对各级电网的电压和功率因数合格率进行计算。为更精细的评估高压配电网的无功运行状态,文献[11]提出了可对高压配电网电压无功的合格程度、无功补偿容量的充裕程度、分接头和电容器的动作次数等进行评估和量化,并可追踪导致运行状态不佳主变的评估指标体系。与其相比,地区电网还包含220 kV和110 kV电压等级的输电系统,其电压无功控制需要考虑上下级和同级间的协调,控制策略更为复杂。为测试AVC系统对地区电网电压无功的控制效果,文献[12-13]建立了可对地区电网技术性和经济性进行评估的指标,但其没有涉及电压不合格原因的追踪,更未涉及无功合格性和平衡性的评估。

结合地区电网的电压无功控制目标和运行特点,本文提出了自动电压控制下的地区电网电压无功运行状态评估指标体系。该指标体系可精细化评估地区电网内各区域的电压合格程度、无功合格程度和无功平衡程度,并可对造成区域电压无功不合格、区域无功不平衡的原因进行追踪和量化,从而为实际系统的运行参数设置、控制策略优化和补偿容量配置提供参考。通过对实际电网数据进行评估分析,证明了所提指标体系的合理性和有效性。

### 1 自动电压控制下的地区电网电压无功运行状态评估指标

地区调度主站的AVC系统根据网络拓扑结构将整个地区电网分为若干个以220 kV枢纽变电站为中心的子区域,为降低AVC系统控制复杂性,地调为县级电网下达电压无功考核指标后常将其作为负荷处理<sup>[5]</sup>。因此,本文的评估对象为地区电网各子区域内110 kV线路和与之直接相连的220 kV、

110 kV变电站组成的输电网络。各区域220 kV变电站的高压侧母线为区域关口。注入110 kV线路的功率都由220 kV变电站控制母线流出,其相当于110 kV线路电源,故将220 kV变电站称为电源站,其控制母线称区域电源母线。110 kV变电站关口为其高压母线,将110 kV变电站及其后所接配网等效为变电站关口上连接的负荷,故将110 kV变电站称为负荷站,其关口母线又称区域负荷母线。

#### 1.1 评估指标的体系结构

本文建立的评估指标体系如图1所示。整个指标体系由区域电源母线电压合格程度及其不合格原因评估指标、区域关口无功合格程度及其不合格原因评估指标和区域负荷无功平衡程度及其不平衡原因评估指标三类一级指标构成。每类一级指标下分别包含合格程度评估指标、平衡程度评估指标、不合格原因追踪指标和不平衡原因追踪指标四类二级指标中的两类。各类二级指标下包含的多类三级指标均为对整个考核时段的电压无功运行状态进行统计和量化后得出的结果。

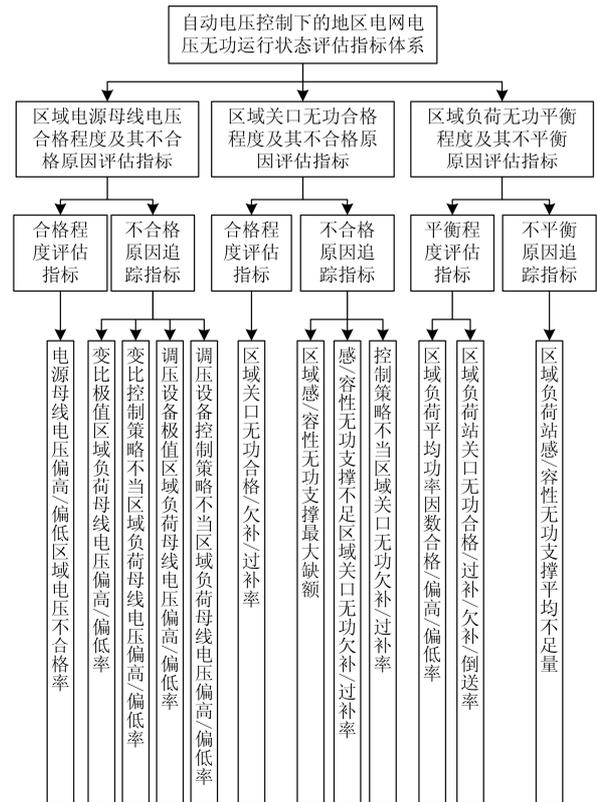


图1 自动电压控制下的地区电网电压无功运行状态评估指标体系结构

Fig. 1 Configuration of the index system for voltage and reactive power operation status evaluation in regional power grid under automatic voltage control

## 1.2 区域电源母线电压合格程度及不合格原因评估指标

### (1) 区域电源母线电压合格程度评估指标

区域电源母线与负荷母线的电压调节是由上至下的,上级调压设备动作会影响整个下级区域电压,因此需根据区域负荷母线电压的整体合格程度评估区域电源母线满足负荷需求的效果。

设在典型日共有  $N$  个数据采集时刻,时刻  $t$  的区域负荷母线电压偏高(低)率  $L'_{LBVOH}$  ( $L'_{LBVOL}$ ) 为

$$L'_{LBVOH(L)} = (n'_{LBVOH(L)} / n_{LB}) \times 100\% \quad (1)$$

式中:上标  $t$  ( $t=1, 2, \dots, N$ ) 表示时刻  $t$  的采样值;  $n_{LB}$  为区域负荷母线总条数;  $n'_{LBVOH}$  ( $n'_{LBVOL}$ ) 为时刻  $t$  区域内电压偏高(低)的负荷母线条数。

为避免调节电压无功控制设备使部分负荷母线电压合格时,引起更大范围电压越限。当负荷母线电压偏高、偏低率过半时才认为电源母线电压不合格。故电源母线电压偏高(低)区域电压不合格率  $L_{GLBVOH}$  ( $L_{GLBVOL}$ ) 为

$$L_{GLBVOH(L)} = (T_{GLBVOH(L)} / N) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $T_{GLBVOH}$ 、 $T_{GLBVOL}$  分别为整个考核时段内  $L'_{LBVOH}$ 、 $L'_{LBVOL}$  大于 50% 的时刻数。

### (2) 区域电源母线电压不合格原因追踪指标

当电源母线电压偏高引起区域电压不合格时,需降低本区域的电源母线电压。若此时电源站高压母线电压偏低或关口无功欠补,则只能降低电源站主变档位,故应追踪主变档位过高的原因是变比达到下限还是变比控制策略不当。若此时电源站高压母线电压合格或偏高,且关口无功合格或过补,则可通过协调电源站主变档位和无功补偿设备以达到降低电源母线电压的目的。故应追踪电源母线电压过高的原因是变比已达下限且没有可切除的电容器和可投入的电抗器,还是控制策略不当。由此构建电源母线电压偏高区域电压不合格的原因性指标:变比极值区域负荷母线电压偏高率指标  $L_{LBVHTL}$ 、变比控制策略不当区域负荷母线电压偏高率指标  $L_{LBVHTT}$ 、调压设备极值区域负荷母线电压偏高率指标  $L_{LBVHML}$  和调压设备控制策略不当区域负荷母线电压偏高率指标  $L_{LBVHMT}$ 。上述指标均可由整个考核时段内相应原因发生的时刻数  $T_{LBVHTL}$ 、 $T_{LBVHTT}$ 、 $T_{LBVHML}$  和  $T_{LBVHMT}$  除以总的时刻数  $N$  得到。

同理,电源母线电压偏低区域电压不合格时,需升高区域电源母线电压。在电源站高压母线电压偏高或关口无功过补时,只能调高电源站主变档位,此时需构建变比极值区域负荷母线电压偏低率指标

$L_{LBVLTl}$  和变比控制策略不当区域负荷母线电压偏低率指标  $L_{LBVLTT}$ 。而在电源站高压母线电压合格或偏低,且关口无功合格或欠补时,可协调电源站调压设备提高电源母线电压,需构建调压设备极值区域负荷母线电压偏低率指标  $L_{LBVLML}$  和调压设备控制策略不当区域负荷母线电压偏低率指标  $L_{LBVLMT}$ 。

若整个考核时段的原因追踪指标结果  $L_{LBVHTL}$ 、 $L_{LBVHTT}$ 、 $L_{LBVHML}$ 、 $L_{LBVHMT}$ 、 $L_{LBVLTl}$ 、 $L_{LBVLTT}$ 、 $L_{LBVLML}$  和  $L_{LBVLMT}$  均为 0,说明区域电源完全满足负荷需求。若某个原因追踪指标结果较大,则应根据相应的追踪结果优化控制策略或配置无功补偿容量。

## 1.3 区域关口无功合格程度及不合格原因评估指标

### (1) 区域关口无功合格程度评估指标

区域无功控制的考核对象是区域关口无功,即区域内所有电源站高压母线的注入功率因数,其可表征地区电网各控制区域间无功的分区平衡程度。区域内可能存在一条或多条注入电源站高压母线的线路,任一线路注入功率不合格,则区域关口无功不合格。分别统计各区域关口无功合格、过补、欠补的时刻数  $T_{AGCOSM}$ 、 $T_{AGCOSH}$  和  $T_{AGCOSL}$ ,除以采样时刻数  $N$ ,即可求得整个考核时段的区域关口无功合格率  $L_{AGCOSM}$ 、过补率  $L_{AGCOSH}$  和欠补率  $L_{AGCOSL}$ 。

### (2) 区域关口无功不合格原因追踪指标

负荷站与电源站的无功协调是由下至上的,AVC 区域无功控制要求协调整个 220 kV 区域内的所有容抗器使区域关口功率因数合格。

时刻  $t$  区域无功总缺额  $\Delta Q'_{GA}$  为

$$\begin{cases} \Delta Q'_{GARj_A} = \max(Q'_{GAj_A} - P'_{GAj_A} \tan \varphi'_{GAmin}, 0) \\ \Delta Q'_{GACj_A} = \min(Q'_{GAj_A} - P'_{GAj_A} \tan \varphi'_{GAmix}, 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta Q'_{GA} = \sum_{j_A=1}^{n_{AGT}} (\Delta Q'_{GARj_A} + \Delta Q'_{GACj_A}) \quad (4)$$

式中:注入区域关口母线总线路条数为  $n_{AGT}$ ;  $\Delta Q'_{GA}$  大于 0 和小于 0 分别表示区域关口无功欠补和过补;  $\Delta Q'_{GARj_A}$  ( $\Delta Q'_{GACj_A}$ ) 为关口母线  $j_A$  ( $j_A=1, 2, \dots, n_{AGT}$ ) 欠(过)补时的感(容)性无功缺额;  $\varphi'_{GAmix}$  ( $\varphi'_{GAmin}$ ) 为区域关口母线功率因数上(下)限对应的功率因数角;  $P'_{GAj_A}$  ( $Q'_{GAj_A}$ ) 为注入电源站高压母线的有(无)功。

在满足电源站和负荷站主变进线侧功率因数约束的前提下,时刻  $t$  区域内所有变电站的感(容)性无功总可调容量  $\Delta Q'_{TARYM}$  ( $\Delta Q'_{TACYM}$ ) 计算方法如下

$$\begin{cases} \Delta Q'_{SACRj_A} = \max(Q_{SACRj_A} - Q'_{TARj_A}, 0) \\ \Delta Q'_{SACCIj_A} = \min(Q_{SACCIj_A} - Q'_{TARj_A}, 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta Q'_{T1RYM_A} = \sum_{m_A=1}^{n_{AT/A}} \max \{ (Q'_{GT1m_A} - P'_{GT1m_A} \tan \varphi'_{T1\max}), 0 \} \\ \Delta Q'_{T1CYM_A} = \sum_{m_A=1}^{n_{AT/A}} \min \{ (Q'_{GT1m_A} - P'_{GT1m_A} \tan \varphi'_{T1\min}), 0 \} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta Q'_{TARYM_A} = \min \{ \Delta Q'_{SACRI_A} - Q'_{TACI_A}, \Delta Q'_{T1RYM_A} \} \\ \Delta Q'_{TACYM_A} = \max \{ \Delta Q'_{SACCI_A} - Q'_{TARI_A}, \Delta Q'_{T1CYM_A} \} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta Q'_{TARYM} = \sum_{l_A=1}^{n_{AS}} \Delta Q'_{TARYM_{l_A}} \\ \Delta Q'_{TACYM} = \sum_{l_A=1}^{n_{AS}} \Delta Q'_{TACYM_{l_A}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:区域内共有变电站 $n_{AS}$ 座; $l_A$  ( $l_A = 1, 2, \dots, n_{AS}$ )为区内各变电站编号; $\Delta Q'_{SACRI_A}$  ( $\Delta Q'_{SACCI_A}$ )为变电站中所有电容(抗)器的感(容)性无功可调总容量; $Q_{SACRI_A}$  ( $Q_{SACCI_A}$ )为变电站中所有电容(抗)器的最大可输出感(容)性无功; $Q'_{TARI_A}$  ( $Q'_{TACI_A}$ )为变电站补偿设备已投入感(容)性无功; $\Delta Q'_{T1RYM_A}$  ( $\Delta Q'_{T1CYM_A}$ )为由功率因数上(下)限确定的变电站感(容)性无功允许调节容量; $m_A$  ( $m_A = 1, 2, \dots, n_{AT/A}$ )为变电站 $l_A$ 内的变压器编号; $P'_{GT1m_A}$  ( $Q'_{GT1m_A}$ )为主变 $m_A$ 进线侧注入有(无)功; $\varphi'_{T1\max}$  ( $\varphi'_{T1\min}$ )为主变 $m_A$ 进线侧功率因数上(下)限对应的功率因数角; $\Delta Q'_{TARYM_A}$  ( $\Delta Q'_{TACYM_A}$ )为变电站 $l_A$ 的感(容)性无功可调容量。

若时刻 $t$ 区域感(容)性无功支撑缺额 $dQ'_{AR}$  ( $dQ'_{AC}$ )为

$$\begin{cases} dQ'_{AR} = \Delta Q'_{GA} - \Delta Q'_{TARYM}, \Delta Q'_{GA} > 0 \\ dQ'_{AC} = \Delta Q'_{GA} - \Delta Q'_{TACYM}, \Delta Q'_{GA} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

若 $dQ'_{AR} > 0$  ( $dQ'_{AC} < 0$ ), 则时刻 $t$ 区域关口无功欠(过)补由区域电容(抗)器补偿容量配置不足引起, 反之, 则由区域无功补偿设备控制策略缺陷引起。由此构建区域感(容)性无功支撑最大缺额 $\Delta Q_{AR}$  ( $\Delta Q_{AC}$ )、感(容)性无功支撑不足区域关口无功欠(过)补率 $L_{QLR}$  ( $L_{QLC}$ )和控制策略不当区域关口无功欠(过)补率 $L_{QTR}$  ( $L_{QTC}$ )

$$\Delta Q_{AR} = \max(dQ'_{AR}) \quad (t = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

$$\Delta Q_{AC} = \min(dQ'_{AC}) \quad (t = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

$$L_{QLR(C)} = (T_{QLR(C)} / N) \times 100\% \quad (12)$$

$$L_{QTR(C)} = (T_{QTR(C)} / N) \times 100\% \quad (13)$$

式中: $T_{QLR}$ 和 $T_{QTR}$ 分别为整个考核时段内的 $dQ'_{AR}$ 大于0和小于0的时刻数; $T_{QLC}$ 和 $T_{QTC}$ 分别为整个考核时段内 $dQ'_{AC}$ 小于0和大于0的时刻数。

若 $L_{QLR}$ 、 $L_{QLC}$ 、 $L_{QTR}$ 、 $L_{QTC}$ 均为0%, 则说明整个考核时段内区域负荷电源间无功协调。若 $L_{QLR}$  ( $L_{QLC}$ )较大则说明区域内的电容(抗)器配置不足, 需根据 $\Delta Q_{AR}$  ( $\Delta Q_{AC}$ )增加电容(抗)器, 若 $L_{QTR}$  ( $L_{QTC}$ )较大则需进行AVC控制策略改良。

#### 1.4 区域负荷无功平衡程度及不平衡原因评估指标

##### (1) 区域负荷无功平衡程度评估指标

将区域内的所有负荷站等效为一个负荷, 得到时刻 $t$ 的区域负荷平均功率因数 $\cos \varphi'_A$ 如下:

$$\cos \varphi'_A = P'_{LB} / \sqrt{(P'_{LB})^2 + (Q'_{LB})^2} \quad (14)$$

$$P'_{LB} = \sum_{i_A=1}^{n_{LB}} P'_{LBi_A} \quad (15)$$

$$Q'_{LB} = \sum_{i_A=1}^{n_{LB}} Q'_{LBi_A} \quad (16)$$

式中: $P'_{LB}$ 和 $Q'_{LB}$ 分别为等效负荷的注入有功和无功; $P'_{LBi_A} + jQ'_{LBi_A}$ 为从110 kV线路注入各区域负荷母线 $i_A$  ( $i_A = 1, 2, \dots, n_{LB}$ )的功率。

区域负荷平均功率因数可用于评估区域内的无功是否分层平衡。若 $\cos \varphi'_A$ 满足负荷站关口功率因数范围 $[\cos \varphi'_{L\min}, \cos \varphi'_{L\max}]$ , 说明区域负荷对上级区域有较好的无功支撑作用。统计考核时段内 $\cos \varphi'_A$ 合格、越上限和越下限的时刻数, 除以总的考核时刻数 $N$ , 即可求得区域负荷平均功率因数合格率 $L_{ACOSM}$ 、偏高率 $L_{ACOSH}$ 和偏低率 $L_{ACOSL}$ 。

区域内各负荷站无功应就地平衡, 一般情况下不允许倒送无功。根据负荷站关口功率因数范围对所有考核时刻功率因数合格、越上限、越下限和倒送无功的负荷母线条数分别进行求和, 再除以区域负荷母线条数和考核时刻数 $N$ 的乘积, 即可求得整个考核时段内区域负荷站关口无功合格率 $L_{COSM}$ 、过补率 $L_{COSH}$ 、欠补率 $L_{COSL}$ 和倒送率 $L_{COSR}$ , 由此实现对区域内负荷站无功就地平衡整体情况的评估。

##### (2) 区域负荷无功不平衡原因追踪指标

区域负荷平均功率因数偏低(高)的原因是区域负荷站感(容)性无功整体支撑不足。整个考核时段内区域负荷站的感(容)性无功支撑平均不足量 $\Delta Q_{LBQLR}$  ( $\Delta Q_{LBQLC}$ )为

$$\begin{cases} \Delta Q_{LBQLR} = \frac{1}{N_{AL}} \sum_{t=1}^N \max(Q'_{LB} - P'_{LB} \tan \varphi_{Lmin}, 0) \\ \Delta Q_{LBQLC} = \frac{1}{N_{AH}} \sum_{t=1}^N \min(Q'_{LB} - P'_{LB} \tan \varphi_{Lmax}, 0) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $N_{AL}$  为  $\cos \varphi'_A$  小于区域关口功率因数下限  $\cos \varphi_{Lmin}$  的时刻数;  $N_{AH}$  为  $\cos \varphi'_A$  大于区域关口功率因数上限  $\cos \varphi_{Lmax}$  的时刻数。

若  $\Delta Q_{LBQLR}$  ( $\Delta Q_{LBQLC}$ ) 均为 0%, 则说明整个考核时段内区域负荷能保持自身无功平衡, 若  $\Delta Q_{LBQLR}$  ( $\Delta Q_{LBQLC}$ ) 较大则说明负荷站无功支撑效果偏离分层平衡目标, 需完善无功投入策略或优化补偿设备容量配置以满足经济运行的需求。

## 2 算例分析

### 2.1 算例参数

本文以广东汕头地区典型负荷日 2014 年 9 月 5 日近 5 min 一个断面, 共 284 个采样时刻的 SCADA 数据为对象进行自动电压控制下地区电网的电压无功运行状态评估与分析。该地区电网当日共有 14 座 220 kV 变电站和 57 座 110 kV 变电站投入运行。通过拓扑分区方法, 将该地区电网分为 13 个 220 kV 控制区域, 各 220 kV 控制区域内包含 1~2 个 220 kV 变电站和 2~8 个 110 kV 变电站, 控制区内的变压器均为有载调压。

依据汕头供电局的相关规定, 指标中 AVC 运行参数上下限值如表 1 所示。

由表 1 可知, 当日高峰时段共 177 个, 占有时段 62.3%, 低谷时段 107 个, 占有时段的 37.7%。

表 1 汕头地区 AVC 运行参数表

开始时间	结束时间	时段类型	功率因数上限	功率因素下限	110kV 电压上限/kV	110kV 电压下限/kV	220kV 电压上限/kV	220kV 电压下限/kV
0:00:00	7:59:59	低谷	0.98	0.95	115	110	232	226
8:00:00	22:59:59	高峰	1	0.95	115	111	232	226
23:00:00	23:59:59	低谷	0.98	0.95	115	110	232	226

表 2 区域电源母线电压合格程度及其不合格原因追踪评估指标结果

Table 2 Voltage qualification degree and disqualification reason evaluation results of area power supply bus

区域号	合格程度评估				不合格原因追踪							
	$L_{GLBVOH} / \%$	$L_{GLBVOL} / \%$			$L_{LBVHTL} / \%$	$L_{LBVHTT} / \%$	$L_{LBVHML} / \%$	$L_{LBVHMT} / \%$	$L_{LBVLTl} / \%$	$L_{LBVLTt} / \%$	$L_{LBVLMl} / \%$	$L_{LBVLMt} / \%$
		全天	全	高								
3	--	1.1	1.1	--	--	--	--	--	--	--	--	1.1
5	--	1.1	1.1	--	--	--	--	--	--	--	--	1.1
7	--	45.4	44.4	1.1	--	--	--	--	--	--	--	45.4
12	--	11.3	11.3	--	--	--	--	--	--	--	--	11.3

### 2.2 区域电源母线电压合格程度及其不合格原因追踪评估指标结果

本文根据表 1 中规定的高峰、低谷时段和电压上下限对汕头地区电网的区域电源母线电压合格程度进行了评估, 并在全天内对区域电源母线电压不合格的原因进行了追踪。存在区域电源母线电压不合格问题的控制区域评估结果如表 2 所示。

区域 3、5、7 和 12 存在不同程度的区域负荷母线电压越下限问题, 其中区域 7 全天的  $L_{GLBVOL} = 45.4\%$ , 即全天内有多达 130 个时刻区域负荷母线电压偏低率  $L'_{LBVOH}$  超过 50%。区域 3、5 和 12 所有的电源母线电压偏低区域电压不合格问题和区域 7 内 44.4% 的电源母线电压偏低区域电压不合格问题均发生在高峰时段, 说明高峰时段区域电源母线不能为下级电网提供足够的电压支持。通过表 2 中的不合格原因追踪可知, 该考核日内引起电源母线电压偏低区域电压不合格的原因均为调压设备控制策略不当, 即现有 AVC 控制策略无法适应高峰低谷时段的调压要求, 需要通过调整区域电源站内主变变比和容抗器控制策略以保证整个区域的负荷母线电压合格率。

### 2.3 区域关口无功合格程度评估及其不合格原因追踪评估指标结果

根据表 1 中的功率因数上下限对汕头地区电网各区域关口在高峰、低谷时段的功率因数合格程度进行了评估, 并在全天内对区域关口无功不合格的原因进行了追踪。13 个区域的关口无功合格程度评估及其不合格原因追踪结果如表 3 所示。

由表 3 的区域关口无功偏高率  $L_{AGCOSH}$  可知, 当日所有区域在低谷时段均出现了区域关口无功过补问题。由于全天内低谷时段占有时段的 37.7%, 故全天内有 8 个区域在超过的 50% 的低谷时段关口无功过补, 其中区域 11~13 在整个低谷时段, 共 9 小时内关口无功过补。根据区域关口无功不合格原因追踪结果可知, 区域 1~10 和 12 的控制策略不当

表 3 区域关口无功合格程度评估及其不合格原因追踪评估指标结果

Table 3 Qualification degree and disqualification reason evaluation results of area gateway reactive power

区域号	合格程度评估						不合格原因追踪					
	$L_{AGCOSH} / \%$			$L_{AGCOSL} / \%$			$L_{QTC} / \%$	$L_{QLC} / \%$	$L_{QTR} / \%$	$L_{QLR} / \%$	$\Delta Q_{AC} / \text{Mvar}$	$\Delta Q_{AR} / \text{Mvar}$
	全天	高峰	低谷	全天	高峰	低谷						
1	33.8	--	33.8	--	--	--	33.8	--	--	--	--	--
2	36.6	--	36.6	--	--	--	36.6	--	--	--	--	--
3	9.2	--	9.2	2.1	2.1	--	9.2	--	2.1	--	--	--
4	16.5	--	16.5	--	--	--	16.5	--	--	--	--	--
5	19.4	--	19.4	--	--	--	19.4	--	--	--	--	--
6	17.6	--	17.6	--	--	--	17.6	--	--	--	--	--
7	15.8	--	15.8	--	--	--	15.8	--	--	--	--	--
8	27.1	--	27.1	--	--	--	27.1	--	--	--	--	--
9	37.0	--	37.0	--	--	--	36.6	0.4	--	--	-0.1	--
10	13.4	--	13.4	3.9	3.9	--	3.2	10.2	3.9	--	-1.6	--
11	37.7	--	37.7	--	--	--	--	37.7	--	--	-10.1	--
12	37.7	--	37.7	--	--	--	1.1	36.6	--	--	-19.8	--
13	37.7	--	37.7	--	--	--	--	37.7	--	--	-11.2	--

区域关口无功过补率  $L_{QTC} > 0$ ，该问题可通过切除区域内的电容器或投入电抗器解决。区域 9~13 的容性无功支撑不足区域关口无功过补率  $L_{QLC} > 0$ ，要解决该问题需根据区域容性无功支撑最大缺额  $\Delta Q_{AC}$  增加区内电抗器容量。

区域 3 和 10 在高峰时段出现了关口无功欠补问题，造成 2 个区域关口无功欠补的原因均为控制策略不当，即  $L_{QTR} > 0$ ，要改善此问题需优化区域内的容抗器投切策略。

对比表 2 可知，在区域关口无功过补较严重的情况下，各区域并未出现电源母线电压偏高区域电压不合格情况，区域 7 甚至出现了区域电压偏低问题。由此说明为满足区域电压水平，低谷时段关口必需保持较高的功率因数，故需要对汕头地区 AVC 运行参数的功率因数整定值进行优化。

#### 2.4 区域负荷无功平衡程度评估及其不平衡原因追踪评估指标结果

汕头地区电网 13 个区域的区域负荷无功平衡程度评估及其不平衡原因追踪结果见表 4。其中区域负荷平均功率因数合格程度分高峰、低谷时段进行评估，区域负荷站关口无功合格程度、区域负荷平均功率因数不合格原因以全天为单位进行评估。

由表 4 中区域负荷平均功率因数偏高率  $L_{ACOSH}$  和偏低率  $L_{ACOSL}$  可知，全天内所有区域均出现了功率因数不合格问题。区域 1~9、11~13 在低谷时段出现区域平均功率因数偏高问题，区域 10 在高峰时段出现区域平均功率因数偏低问题。区域负荷平均功率因数偏高、偏低说明负荷层无功不能内部平衡，将对各控制区内无功的分层平衡产生影响。由表 4 中的不平衡原因追踪结果可知，区域 1~9、11~13 存在负荷站容性无功支撑平均不足问题，各区域的

表 4 区域负荷无功平衡程度评估及其不平衡原因追踪评估指标结果

Table 4 Balance level and unbalance reason evaluation results of area load reactive power

区域号	平衡程度评估						不平衡原因追踪		
	$L_{ACOSH} / \%$		$L_{ACOSL} / \%$		$L_{COSH} / \%$	$L_{COSL} / \%$	$L_{COSR} / \%$	$\Delta Q_{LBQLR} / \text{Mvar}$	$\Delta Q_{LBQLC} / \text{Mvar}$
	高峰	低谷	高峰	低谷					
1	--	12.0	--	--	18.8	11.4	--	--	-0.2
2	--	37.7	--	--	30.1	0.2	2.6	--	-10.1
3	--	34.5	--	--	9.9	27.3	8.6	--	-9.7
4	--	37.0	--	--	20.7	18.8	5.2	--	-4.5
5	--	36.6	--	--	22.6	23.8	5.1	--	-7.6
6	--	34.9	--	--	12.9	10.8	16.7	--	-4.9
7	--	37.7	--	--	26.7	1.8	15.8	--	-16.9
8	--	8.5	--	--	13.7	18.0	18.3	--	-6.1
9	--	35.2	--	--	28.2	0.4	2.1	--	-4.1
10	--	--	58.5	--	--	58.3	--	1.1	--
11	--	1.8	--	--	1.5	4.0	--	--	-5.0
12	--	37.3	--	--	36.6	0.4	--	--	-3.5
13	--	37.7	--	--	31.2	9.5	--	--	-3.3

容性无功支撑平均不足量如  $\Delta Q_{LBQLC}$  所示。其中容性无功支撑平均不足量最大的为区域 7，即为满足区域无功分层平衡要求，区域 7 在每个功率因数偏高时刻点的平均容性无功缺额为 16.7Mvar。区域 10 的负荷站感性无功支撑平均不足量  $\Delta Q_{LBQLR}$  为 1.1 Mvar，其为区域 10 内的所有负荷站在每个功率因数偏低时刻点需增投的感性无功总和。

由表 4 中的区域负荷母线过补率  $L_{COSH}$ 、欠补率  $L_{COSL}$  和倒送率  $L_{COSR}$  可知，全天内  $L_{COSH}$  最高、最低的区域分别为区域 12 和区域 10，分别为 36.6% 和 0%； $L_{COSL}$  最高、最低的区域分别为区域 10 和区域 2，分别为 58.3% 和 0.2%； $L_{COSR}$  最高的区域为区域 8，为 18.3%。

因此可知,汕头地区无功分层、就地控制效果较差,需优化区域内所有负荷站的AVC控制策略和补偿装置配置,以提升无功分层和就地平衡效果,进一步减小系统网损。

### 3 结论

本文提出了一套自动电压控制下的地区电网电压无功运行状态评估指标体系,该指标体系以地区电网内的各220 kV控制区域为评估对象,可从区域电压合格程度、关口无功合格程度和区域无功平衡程度的角度对各区域的电压无功运行状态进行精细化评估,并可对造成不合格和不平衡的原因进行追踪和量化。利用本文所提评估指标体系中的合格性指标和平衡性指标对广东汕头地区电网的电压无功运行状态进行评估,评估结果反映了汕头电网各区域电压无功运行中的典型问题。利用指标体系中的原因追踪指标对引起各类典型问题的原因进行量化,得到的评估结果已被采纳为汕头地区AVC运行参数值整定、各区域无功容量配置和控制策略优化的重要依据。

### 参考文献

- [1] 黄华,高宗和,戴则梅,等.基于控制模式的地区电网AVC系统设计与应用[J].电力系统自动化,2005,29(15):77-80.  
HUANG Hua, GAO Zonghe, DAI Zemei, et al. Design and application of AVC system for district power network based on control modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 77-80.
- [2] 孙建伟,王宗兴,夏亚君,等.地区智能电网分布式电压无功自动控制系统研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(13):112-116.  
SUN Jianwei, WANG Zongxing, XIA Yajun, et al. Study on distributed reactive power and voltage automatic control in regional smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 112-116.
- [3] 欧睿,张琳,杨渝璐.重庆跨辖区一体化调度自动化系统建设分析与研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(22):130-133.  
OU Rui, ZHANG Lin, YANG Yulu. An analysis and research for power dispatching automation across jurisdictions in Chongqing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 130-133.
- [4] 孙辉,刘松楠,周玮,等.辽宁电网220 kV系统自动电压控制关键技术研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(19):43-48.  
SUN Hui, LONG Songnan, ZHOU Wei, et al. Key technologies research on automatic voltage control in Liaoning power grid 220 kV system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 43-48.
- [5] 刘颖英,徐永海,肖湘宁.地区电网电能质量综合评估新方法[J].中国电机工程学报,2008,28(22):130-136.  
LIU Yingying, XU Yonghai, XIAO Xiangning. Analysis of new method on power quality comprehensive evaluation for regional grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 130-136.
- [6] 张伯明,孙宏斌,邓佑满,等.面向地区电网的EMS应用软件[J].电力系统自动化,2000,24(5):40-44,48.  
ZHANG Boming, SUN Hongbin, DENG Youman, et al. Advanced application software package of EMS developed for sub-transmission power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(5): 40-44, 48.
- [7] 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.
- [8] 中华人民共和国能源部. SD325-89 电力系统电压和无功电力技术导则[S].北京:中华人民共和国能源部,1989.
- [9] 南方电网公司.中国南方电网电压质量和无功电力管理标准[S].广东:南方电网公司,2005.
- [10] 广东电网公司.广东电网公司电力系统电压质量和无功电力管理办法[S].广州:广东电网公司,2009.
- [11] 颜伟,田志浩,余娟,等.高压配电网无功运行状态评估指标体系[J].电网技术,2011,35(10):104-109.  
YAN Wei, TIAN Zhihao, YU Juan, et al. An index system to assess reactive power operation in high voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 104-109.
- [12] 田洪,张焰,张益波.地区电网运行方式评估方法[J].电力系统保护与控制,2009,37(20):93-98.  
TIAN Hong, ZHANG Yan, ZHANG Yibo. The evaluation method of regional power grid operation mode[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 93-98.
- [13] 万卫,王淳,程虹,等.电网评价指标体系的初步框架[J].电力系统保护与控制,2008,36(24):14-18.  
WAN Wei, WANG Chun, CHENG Hong, et al. Preliminary frame of index system for evaluating power network[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 14-18.

收稿日期:2015-08-01; 修回日期:2015-11-24

作者简介:

林捷(1975-),男,工学学士,高级工程师,从事电力自动化工作;E-mail:1759924029@qq.com

王云柳(1991-),女,通信作者,硕士研究生,研究方向为电力系统无功优化及电压稳定;E-mail:yunliu1206@163.com

黄辉(1970-),男,工学学士,电气工程师,从事电力调度及自动化管理工作。E-mail:1035949489@qq.com

(编辑 张爱琴)