

高压配电网无功运行状态评估指标体系

颜伟¹, 田志浩¹, 余娟¹, 杜跃明², 李振文¹

- (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 400044;
2. 余杭供电局, 浙江省 杭州市 311100)

An Index System to Assess Reactive Power Operation in High Voltage Distribution Network

YAN Wei¹, TIAN Zhihao¹, YU Juan¹, DU Yueming², LI Zhenwen¹

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Yuhang Power Supply Bureau, Hangzhou 311100, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The existing regulation for voltage/reactive power management is scant of both quantitative criteria with strong operability and related index system to assess reactive power operation in power network, for this reason, an index system to assess reactive power operation in high-voltage distribution network is proposed. The proposed index system assesses reactive power operation of high-voltage distribution network in two sides, i.e., the configuration of reactive power compensation capacity and control ability of voltage and reactive power. Using the proposed index system, the problems related to voltage and reactive power operation in high-voltage distribution network can be traced and the concrete main power transformer causing the problem can be tracked down, and then reactive control strategy of voltage/reactive power can be drafted. The application of the proposed index system in Yuhang high-voltage distribution network verifies the correctness and rationality of this index system. The proposed index system could be available for refined management of voltage and reactive power operation.

KEY WORDS: high voltage distribution network; reactive compensation; voltage/reactive power control; assessment index

摘要:我国现有电压无功管理相关规定缺乏操作性较强的量化标准以及客观合理的电网无功运行状态评估体系,为此提出了高压配电网无功运行状态评估指标体系,该体系从无功补偿容量配置、电压无功控制能力2方面评估高压配电网的无功运行状态,利用该指标体系的评估结果能够追踪高压配电网中存在的电压无功问题,并可追踪到引起该类问题的具体主变,进而可制定合理的电压无功控制策略。该指标体系

在浙江余杭高压配电网的无功运行状态评估中的应用验证了其正确性和合理性,可为电压无功运行的精细化管理提供参考。

关键词: 高压配电网; 无功补偿; 电压无功控制; 评估指标

0 引言

配电网是直接面对用户的电力网络,其主要目标为使供电区域内用户的用电需求得到满足,同时追求供电企业自身效益的最大化。高压配电网是连接输电网与中压配电网的纽带,直接关系着供电质量和供电效益,在其实际运行过程中,需要精确掌握电网运行状态,分析运行中存在的薄弱环节,为电网的进一步规划指明方向^[1-4]。

合理的无功补偿容量配置及有效的电压无功控制措施,不仅能保证高压配电网电压质量,提高电网运行的安全稳定性,而且能降低电网电能损耗,提高设备输电能力,充分发挥高压配电网运行经济效益。目前,现有文献^[5-12]主要针对电网无功优化及规划方法进行研究,未深入研究电网无功运行状态评估方法。为此,有必要从无功补偿容量配置和电压无功控制能力2方面建立高压配电网评估体系,以精细化评估高压配电网无功运行状态。

现有电压无功运行导则和规定^[13-15]明确了无功补偿设备的配置原则、各级电压质量的合格范围及功率因数的合理运行水平,是指导我国电网电压无功运行、规划和管理的重要考核依据,但还无法完全满足精细评估电网无功运行状态的要求,因而有必要提出全面精细化的评估指标体系^[1-3]。文献[8]提出以“发电厂平均功率因数”为指标,评价220 kV及以下电网的感性无功充裕情况,以确定合理的感

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).

性无功补偿容量，但未涉及容性无功补偿容量配置和电压无功控制能力的评估问题，因此无法全面评估电网无功运行状态。文献[9]从配置水平、维护水平和运行水平 3 方面建立了一套较完备的城市配电网电压无功现状评估指标体系，能够较全面地评估全网的电压无功现状，但该指标体系针对的是全网评估，无法精细到变电站和主变的无功运行状态，因而无法确定电压无功问题出现的原因。另外，现有导则和规定^[5-7]一般根据负荷的轻重载水平分别给出电压无功的考核要求和运行期望，因此有必要以全网、变电站和主变为对象，评估功率因数、电压和中枢点调压与负荷轻重载水平的匹配情况。

本文结合电网实际运行特点，依据各相关导则和规定的考核标准和运行期望，将分别从无功补偿容量配置及电压无功控制能力 2 方面提出高压配电网无功运行状态评估指标体系，以追踪存在的电压无功问题及导致该类问题的根源，以期为高压配电网电压无功运行的精细化管理提供参考。

1 高压配电网无功运行状态评估指标

1.1 无功运行状态评估指标体系结构

无功运行状态评估指标体系是进行高压配电网无功运行状态评估的基础，指标体系的优劣直接影响评估结果的好坏。由于高压配电网无功补偿装置和电压无功控制装置一般集中在变电站内，因此本文提出的评估指标体系主要针对变电站内主变和整个高压配电网，以实现由点到面地评估。该评估指标体系主要由无功补偿容量配置和电压无功控制能力 2 类一级指标构成，其结构如图 1 所示。

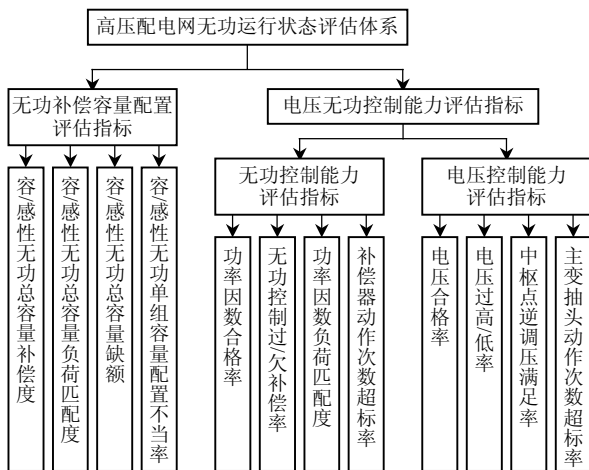


图 1 高压配电网无功运行状态评估指标体系结构

Fig. 1 Configuration of the index system to assess reactive power operation in high voltage distribution network

1.2 无功补偿容量配置评估指标

无功补偿容量配置评估指标主要用于评估主变和高压配电网无功补偿的总容量，确定单组容量配置是否充裕、是否满足负荷轻重载水平下的电压无功考核要求，并追踪存在的无功配置问题，确定引起问题的原因，该指标包括以下 4 种二级指标：

1) 容/感性无功总容量补偿度。

容/感性无功总容量补偿度主要用来评估变电站内主变及高压配电网容/感性无功补偿总容量配置是否满足相关导则及规定要求。设高压配电网有 m 座变电站，变电站 $i(i=1,2,\dots,m)$ 的主变台数为 n_i ，变电站 i 的第 $j(j=1,2,\dots,n_i)$ 台主变的额定容量、容/感性无功补偿配置的总容量分别为 S_{ij} 、 C_{ij} 、 R_{ij} ，则第 j 台主变的容性无功总容量补偿度为

$$C_{CMTj} = (C_{ij} / S_{ij}) \times 100\% \quad (1)$$

整个高压配电网的容性无功总容量补偿度为

$$C_{CHDN} = (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} S_{ij}) \times 100\% \quad (2)$$

若将式(1)(2)中的 C_{ij} 换为 R_{ij} 可定义为主变和高压配电网的感性无功总容量补偿度 C_{RMTj} 、 C_{CHDN} 。

按照相关规定，220、110kV 变电站主变的容性无功总容量补偿度合理范围分别为 10%~25%和 10%~30%^[7]。

2) 容/感性无功总容量负荷匹配度。

容/感性无功总容量负荷匹配度主要用来评估主变和高压配电网的容/感性无功补偿总容量能否满足功率因数考核要求。设在典型日内共有 N 个数据采集时刻，时刻 $k(k=1,2,\dots,N)$ 时，变电站 i 的第 j 台主变的有功负荷、无功负荷分别为 P_{ij-k} 、 Q_{ij-k} ，功率因数考核上下限分别为 $\cos\varphi_{\max-k}$ 、 $\cos\varphi_{\min-k}$ ，全网的有功负荷、无功负荷及无功损耗分别为 P_k 、 Q_k 、 L_k ，则

$$L_{MDOC} = (T_{LC} / N) \times 100\% \quad (3)$$

$$L_{MDOR} = (T_{LR} / N) \times 100\% \quad (4)$$

式中： L_{MDOC} 、 L_{MDOR} 分别为单台主变及整个高压配电网的容/感性无功总容量负荷匹配度； T_{LC} 、 T_{LR} 分别为典型日内容/感性无功总容量满足功率因数考核要求的时刻数量。对于单台主变，若 $(C_{ij} + P_{ij-k} \tan\varphi_{\min-k}) \geq Q_{ij-k}$ 或 $(-R_{ij} + P_{ij-k} \tan\varphi_{\max-k}) \leq Q_{ij-k}$ ，则 k 为满足功率因数考核要求的时刻。对于高压

配电网，若 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (C_{ij} + P_{ij-k} \tan\varphi_{\min-k}) \geq (Q_k + L_k)$ 或

$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (-R_{ij} + P_{ij-k} \tan \varphi_{\max-k}) \leq (Q_k + L_k)$, 则 k 为满足率因数考核要求的时刻。

若 L_{MDOC} 、 L_{MDOR} 均为 100%，则容/感性无功补偿总容量完全满足该典型日的功率因数考核要求。 $L_{\text{MDOC}}/L_{\text{MDOR}}$ 越小，则容/感性无功补偿总容量对负荷的匹配程度越低，即现有容/感性无功补偿总容量配置不充分，需要考虑增加无功补偿配置。

3) 容/感性无功总容量缺额。

对于容/感性无功总容量不满足功率因数考核要求的时刻，为达到功率因数考核要求需要增加的容/感性无功总容量的均值为容/感性无功总容量缺额(C_{RTCS} 、 R_{RTCS})。 C_{RTCS} 、 R_{RTCS} 是对容/感性无功总容量负荷匹配度的进一步补充，可定量评估主变和高压配电网容/感性无功补偿总容量的缺额。

4) 容/感性无功补偿设备单组容量配置不当率。

容/感性无功补偿设备单组容量配置不当率用于评估主变容/感性无功补偿设备单组容量配置能否满足功率因数考核要求。设变电站 i 的第 j 台主变的容/感性无功补偿设备单组容量分别为 $C_{\text{S-}ij}$ 、 $R_{\text{S-}ij}$ ，高压侧流过的有功功率、无功功率分别为 $P_{ij\text{H-}k}$ 、 $Q_{ij\text{H-}k}$ ，则

$$I_{\text{ROSC}} = (T_{\text{IC}} / N) \times 100\% \quad (5)$$

$$I_{\text{ROS R}} = (T_{\text{IR}} / N) \times 100\% \quad (6)$$

式中： I_{ROSC} 、 $I_{\text{ROS R}}$ 为容/感性无功补偿设备单组容量配置不当率； T_{IC} 和 T_{IR} 分别为典型日内容/感性无功补偿设备单组容量无论投切都不能满足功率因数要求的时刻数量。对于单台主变，若 $Q_{ij\text{H-}k} > P_{ij\text{H-}k} \tan \varphi_{\min-k}$ 且 $Q_{ij\text{H-}k} - Q_{\text{S-}ij} < P_{ij\text{H-}k} \tan \varphi_{\max-k}$ ，或 $Q_{ij\text{H-}k} < P_{ij\text{H-}k} \tan \varphi_{\max-k}$ 且 $Q_{ij\text{H-}k} + Q_{\text{S-}ij} > P_{ij\text{H-}k} \tan \varphi_{\min-k}$ ，则 k 为容性($Q_{\text{S-}ij} = C_{\text{S-}ij}$ 时)或感性($Q_{\text{S-}ij} = R_{\text{S-}ij}$ 时)无功补偿设备单组容量无论投切都不能满足功率因数要求的时刻。

若 I_{ROSC} 、 $I_{\text{ROS R}}$ 均为 0%，则表明配置的容/感性无功补偿设备单组容量能完全满足该典型日的功率因数考核要求。 I_{ROSC} 、 $I_{\text{ROS R}}$ 越大，则配置的单组容量对负荷的匹配程度越低，即现有容/感性无功补偿单组容量配置不当，需要考虑重新配置该主变的无功补偿设备单组容量。

1.3 电压无功控制能力评估指标

电压无功控制能力评估指标主要用于评估主变和高压配电网在典型日负荷轻重载水平下的功率因数、电压的考核情况及运行期望的满足情况，

以追踪存在的电压无功问题，确定引起问题的原因，该一级指标包括以下 2 种二级指标：

1) 无功控制能力。

无功控制能力指标包括功率因数合格率、无功控制过/欠补偿率、功率因数负荷匹配度和电容/抗器动作次数超标率 4 种三级指标。功率因数合格率各供电单位已有统计方法，本文不再赘述，以下将介绍其余各三级指标。

① 无功控制过/欠补偿率。

无功控制过补偿率用于评估典型日内由于过度投入电容器或过度切除电抗器而导致考核点功率因数越过上限的情况。无功控制欠补偿率用于评估典型日内由于少投入电容器或少切除电抗器而导致考核点功率因数低于下限的情况。设在 k 时刻，变电站 i 的第 j 台主变的实际无功补偿容量和高压侧功率因数分别为 $Q_{ij\text{A-}k}$ 、 $\cos \varphi_{ij-k}$ ，则

$$E_{\text{RORC}} = (T_{\text{ER}} / N) \times 100\% \quad (7)$$

$$L_{\text{RORC}} = (T_{\text{LR}} / N) \times 100\% \quad (8)$$

式中： E_{RORC} 、 L_{RORC} 为无功控制过/欠补偿率； T_{ER} 、 T_{LR} 为典型日内无功控制过/欠补偿的时刻数量。对于单台主变，若 $\cos \varphi_{ij-k} > \cos \varphi_{\max-k}$ ，并且如果切除 1 组或多组电容器或者投入 1 组或多组电抗器后，满足 $\cos \varphi_{\min-k} \leq \cos \varphi_{ij-k} \leq \cos \varphi_{\max-k}$ ，则 k 为无功控制过补偿时刻；若 $\cos \varphi_{ij-k} < \cos \varphi_{\min-k}$ ，并且如果投入 1 组或多组电容器或者切除 1 组或多组电抗器后，满足 $\cos \varphi_{\min-k} \leq \cos \varphi_{ij-k} \leq \cos \varphi_{\max-k}$ ，则 k 为无功控制欠补偿时刻。对全网主变考核点的无功控制过/欠补偿率取加权平均可得到全网的无功控制过/欠补偿率。

在典型日内，若 E_{RORC} 、 L_{RORC} 保持较高水平，则表明该主变的无功补偿控制策略制定的不恰当，从而会导致功率因数越限，此时需要对该主变无功补偿控制策略进行修正。

② 功率因数负荷匹配度。

实际电网运行中，高峰与低谷负荷时段对功率因数的考核要求和运行期望不同，如高峰、低谷时段功率因数考核范围分别为 0.95~1、0.93~0.97 pu，并且期望高峰负荷时功率因数偏向考核范围的上限，低谷负荷时偏向考核范围的下限。因此，除了功率因数合格率外，还有必要评估功率因数能否满足负荷轻重载情况下的功率因数期望及其满足程度，即功率因数负荷匹配度：

$$L_{\text{MDOPF}} = (T_{\text{PF}} / N) \times 100\% \quad (9)$$

式中 T_{PF} 为典型日内高峰、低谷时刻功率因数满足

负荷轻重载情况下功率因数期望的时刻数量。对于单台主变，若高峰时段时 $\cos\varphi_{ij-k} > 0.97$ ，则 k 为功率因数满足负荷重载下功率因数期望的时刻；若低谷时段时 $0.95 > \cos\varphi_{ij-k} > 0.93$ ，则 k 为功率因数满足负荷轻载下功率因数期望的时刻。对全网主变考核点的功率因数负荷匹配度取加权平均可得到全网的功率因数负荷匹配度。

L_{MDOPF} 越高，则表明功率因数与负荷相匹配的期望程度越高。 L_{MDOPF} 较低，则表明该主变的无功补偿控制策略制定的不够完善，从而导致功率因数与负荷相匹配的期望程度不高，此时可考虑对该主变的无功补偿控制策略进行改进。

③ 补偿器动作次数超标率。

补偿器动作次数超标率主要用于评估电容器、电抗器是否动作频繁以及频繁动作的程度。设变电站 i 的第 j 台主变在规定时段内补偿器的实际动作次数为 T_{ij} 、动作次数上限为 T_{max} ，则

$$E_{ROC} = \max\left\{\frac{T_{ij} - T_{max}}{T_{max}} \times 100\%, 0\right\} \quad (10)$$

如果 E_{ROC} 不为 0，则该补偿器存在动作频繁问题， E_{ROC} 越大，动作频繁程度越严重。

2) 电压控制能力。

电压控制能力评估指标主要包括电压合格率、电压过高/低率、中枢纽逆调压满足率和主变抽头动作次数超标率 4 种三级指标。电压合格率各供电单位已有统计方法，电压过高/低率与电压合格率类似，本文不再赘述。主变抽头动作次数超标率(E_{ROT})的定义与 E_{ROC} 类似，本文也不再阐述，以下将主要介绍中枢纽逆调压满足率。

中枢纽逆调压满足率(S_{RORV})主要评估通过实际电压无功控制使中枢纽满足逆调压原则的程度。逆调压原则为：中枢纽电压在高峰负荷时较额定电压升高 5%，在低谷负荷时下降为额定电压。

$$S_{RORV} = (T_{RV} / N) \times 100\% \quad (11)$$

式中 T_{RV} 为典型日内中枢纽满足逆调压原则的时刻数量。设在时刻 k ，中枢纽 i 的额定电压和实际电压分别为 U_N 和 U_{i-k} ，若高峰时段满足 $1.07U_N > U_{i-k} > 1.03U_N$ 或低谷时段满足 $1.03U_N > U_{i-k} > U_N$ ，则 k 为满足中枢纽逆调压时刻。对全网所有中枢纽的逆调压满足率取加权平均可得到全网的中枢纽逆调压满足率。

S_{RORV} 越高，则表明中枢纽逆调压情况越理想，电压水平越好。逆调压满足率考核也可分高峰时段和低谷时段分别考核。若 S_{RORV} 较低，则表明该中枢纽的电压控制策略制定的不够完善，从而导致中枢纽满足逆调压原则的程度不高，此时可考虑对该中枢纽的电压控制策略进行改进。

2 算例分析

2.1 算例参数

本文选取 2009 年 1 月 25 日(冬季最小负荷典型日)和 7 月 16 日(夏季最大负荷典型日)的浙江余杭电网为对象进行无功运行状态评估。该电网共有 3 座 220 kV 变电站和 13 座 110 kV 变电站。220、110 kV 变电站的总容量分别为 1200、1019 MVA，安装电容器的总容量分别为 139.2、271.8 Mvar，均未安装电抗器。典型日下，余杭电网可分为大陆变供区、乾元变供区和横岭变供区 3 个独立的高压配电网，如图 2 所示。本节将选取具有代表性的乾元变供区加以分析，其中乾元变供区的五杭、塘栖变电站内的主变序号从左至右依次增大。

2.2 乾元变供区无功补偿容量配置评估

本文分别在最大和最小负荷典型日对乾元变供区高压配电网及各主变进行了容/感性无功补偿容量配置评估，结果如表 1、2 所示。

由表 1 可知，在容性无功容量配置方面，乾元变供区全网容性无功补偿度符合规定，且不存在容性无功补偿总容量不足或单组容量配置不当的问题。但由五杭 1 号主变评估结果($C_{CMTj} > 10\%$ 、

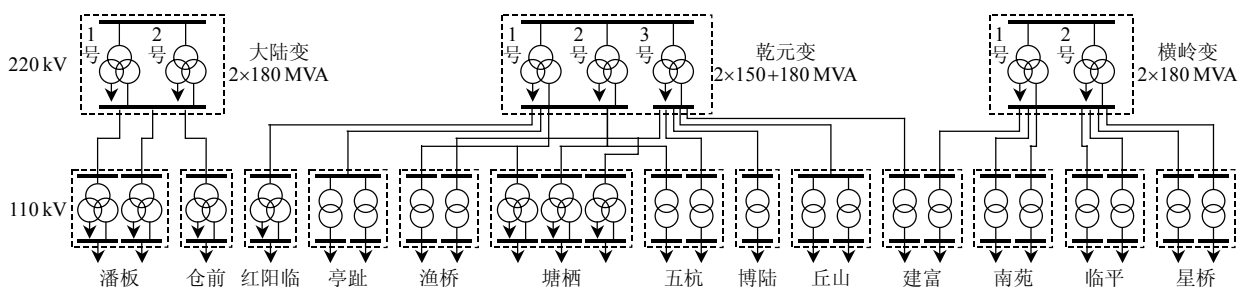


图 2 余杭高压配电网结构
Fig. 2 Structure of Yuhang high voltage distribution network

表 1 乾元变供区及主变容性无功补偿容量配置评估结果
Tab. 1 Assessment of capacitor reactive compensation capacity for Qianyuan substation district and its transformers

高压配电网及 变电站主变	容性无功补偿容量配置评估			
	$C_{CMTj}/\%$	$L_{MDOC}/\%$	C_{RTCS}/Mvar	$I_{ROSC}/\%$
乾元变供区	14.0	100	0.0	0
乾元 1 号主变	12.8	100	0.0	0
乾元 2 号主变	12.8	100	0.0	0
乾元 3 号主变	10.7	100	0.0	0
五杭 1 号主变	12.0	60	3.2	0
五杭 2 号主变	15.0	100	0.0	0
塘栖 1 号主变	15.2	100	0.0	0
塘栖 2 号主变	15.2	100	0.0	0
塘栖 3 号主变	0.0	20	1.1	0

表 2 乾元变供区及主变感性无功补偿容量配置评估结果
Tab. 2 Assessment of inductive reactive compensation capacity in Qianyuan substation district and its transformers

高压配电网及 变电站主变	感性无功补偿容量配置评估			
	$C_{RMTj}/\%$	$L_{MDOR}/\%$	R_{RTCS}/Mvar	$I_{ROSR}/\%$
乾元变供区	0	8	4.1	0
乾元 1 号主变	0	0	2.4	0
乾元 2 号主变	0	12	0.8	0
乾元 3 号主变	0	0	1.2	0
五杭 1 号主变	0	0	0.9	0
五杭 2 号主变	0	0	0.9	0
塘栖 1 号主变	0	0	0.3	0
塘栖 2 号主变	0	0	0.4	0
塘栖 3 号主变	—	—	—	—

注：“—”表示因该台主变停运，各项指标无法统计。

$L_{MDOC}=60\%$ 、 $C_{RTCS}=3.2\text{ Mvar}$ 、 $I_{ROSC}=0$)可知，虽然其容性无功总容量补偿度符合规定，但容性无功补偿总容量已不满足典型日的功率因数考核要求，存在 3.2 Mvar 的容性无功缺额，需考虑加装容性无功补偿设备。塘栖变 3 号主变则由于未装设电容器 ($C_{CMTj}=0$) 导致无功总容量负荷匹配度过低 ($L_{MDOC}=20\%$)，存在 1.1 Mvar 的容性无功缺额。同理可得其余主变不存在容性无功容量配置问题。

由表 2 可知，虽然乾元变供区从全网角度来看不存在容性无功容量配置问题，但从局部主变来看五杭 1 号主变和塘栖 3 号主变存在容性无功总容量配置不足问题，需考虑加装容性无功补偿设备。

由于余杭电网未装设电抗器等感性无功补偿

设备，因此从全网到主变 C_{RMTj} 均为 0，且在冬季最小负荷典型日，供区和各主变的感性无功总容量负荷匹配度非常低 ($L_{MDOR}=0\%$ 、 8% 或 12%)。110 kV 主变的感性无功缺额反映到 220 kV 乾元变及整个供区，使感性无功缺额不断集中(乾元 1 号主变 $R_{RTCS}=2.4\text{ Mvar}$ ；乾元变供区 $R_{RTCS}=4.1\text{ Mvar}$)。因此乾元变供区各主变均存在感性无功补偿不足问题，需对该供区装设电抗器无功补偿装置以改善整个网络在最小负荷时的无功消耗能力。

由以上分析可知，容/感性无功补偿容量配置评估指标不仅能评估乾元变供区及其主变的容/感性无功配置情况，还能够追踪其容/感性无功容量配置问题，确定引起问题的原因，实现精细化评估。

2.3 乾元变供区电压无功控制能力评估

根据余杭供电局动作次数规定，余杭电网 1 d 内主变抽头动作限制次数为：0:00—7:00 为 4 次，7:00—10:00 为 4 次，10:00—22:00 为 8 次，22:00—24:00 为 2 次；1 d 内电容器的动作次数限制根据所安装主变电压等级的不同分为：10 次(220 kV)、24 次(110 kV)。乾元变供区及主变电压无功控制能力评估结果见表 3。

在无功控制能力方面，渔桥 1、2 号主变的功率因数合格率分别为 87.7%、95.5%，均不太高，这是由无功过补偿引起的($E_{RORC}=12.3\%$ 、 4.5%)，即低谷负荷时段存在过度投入或未及时切除电容器的情况。在功率因数合格时段，无功补偿控制与负荷匹配较好 ($L_{MDOPF}>80\%$)，大部分时刻功率因数均控制在理想范围内。由 E_{ROC} 指标可知，渔桥 2 台主变的 3、4 号电容器均存在频繁动作问题，需对其电压无功控制装置的动作策略进行改进。

在电压控制能力方面，渔桥 1、2 号主变电压分别存在过低和过高问题，电压合格率均不高，且逆调压情况也不理想 ($S_{RORV}<45\%$)。22:00—24:00 期间，渔桥 1、2 号主变抽头动作次数超标。经分析，以上问题主要是由负荷峰谷差过大、电压波动

表 3 乾元变供区及主变电压无功控制能力评估结果

Tab. 3 Assessment of voltage/reactive power control for Qianyuan substation district and its transformers

高压配电网及 变电站主变	无功控制能力评估/%				电压控制能力评估/%			
	功率因数合格率	E_{RORC}/L_{RORC}	L_{MDOPF}	E_{ROC}	电压合格率	电压过高/低率	S_{RORV}	E_{ROT}
乾元变供区	96.1	3.9/0	94.7	47.3	93.8	4.8/1.4	50.6	0,0,0,26.5
丘山 1 号主变	100.0	0/0	100.0	0(1 号电容器)、0(3 号电容器)	100.0	0/0	70.2	0,0,0,100
丘山 2 号主变	100.0	0/0	100.0	0(2 号电容器)、0(4 号电容器)	100.0	0/0	63.5	0,0,0,50
渔桥 1 号主变	87.7	12.3/0	83.6	0(1 号电容器)、295.8(3 号电容器)	84.1	0/15.9	36.2	0,0,0,100
渔桥 2 号主变	95.5	4.5/0	85.1	0(2 号电容器)、266.7(4 号电容器)	86.3	13.7/0	44.7	0,0,0,100

注： E_{ROT} 指标中， a,b,c,d 分别表示在 4 个时刻的主变抽头动作次数超标率为 $a\%$ 、 $b\%$ 、 $c\%$ 、 $d\%$ 。

较大造成,特别在 22:00—24:00 期间,2 台主变抽头由于电压水平偏低,需要连调多档以维持电压合格。22:00—24:00 期间,丘山 1、2 号主变也存在主变抽头动作次数超标的问题。该区其余各台主变的电压无功控制能力评估结果较为理想。

3 结论

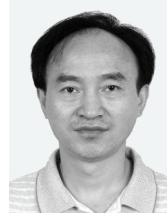
本文提出的高压配电网无功运行状态评估指标体系中的每个指标均具有较强的针对性,且互为补充、互为支撑。该指标体系可从无功补偿容量配置和电压无功控制能力 2 方面评估各变电站主变和整个高压配电网的无功运行状态。利用本文评估指标体系对余杭高压配电网的乾元变供区进行了从主变到全网的评估,评估结果不仅反映了乾元变供区高压配电网的无功运行状况,而且能根据评估结果对存在的电压无功问题追踪到导致问题的具体主变,本文研究结论已被余杭供电局采纳,并将被用作余杭高压配电网无功运行规划的重要参考。随着设备水平的不断提高,对高压配电网的具体运行要求也在发生改变。因此,有必要进一步完善各分类具体指标的定义和评价标准。

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] 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(in Chinese).
- [2] 马世英,印永华,李柏青,等. 我国互联电网电压稳定评价标准框架探讨[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 8-13.
Ma Shiyong, Yin Yonghua, Li Baiqing, et al. A research on voltage stability evaluation criteria for interconnected power grid in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 8-13(in Chinese).
- [3] 李欣然,刘杨华,朱湘有,等. 高压配电网建设规模的评估指标体系及其应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 18-24.
Li Xinran, Liu Yanghua, Zhu Xiangyou, et al. Indices system and its application for evaluating planning scale of HV distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 18-24(in Chinese).
- [4] Prada R B, Palomino E G C, Santos J O R dos, et al. Voltage stability assessment for real-time operation[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 175-181.
- [5] 邱晓燕,张子健,李兴源. 基于改进遗传内点算法的电网多目标无功优化[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 27-33.
Qiu Xiaoyan, Zhang Zijian, Li Xingyuan. Multi-objective reactive power optimization based on improved genetic-interior point algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 27-33(in Chinese).
- [6] 程军照,李蔚森,程强. 一种无功优化预测校正内点算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 152-157.
Cheng Junzhao, Li Shusen, Cheng Qiang. A predictor-corrector interior point method for optimal reactive power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 152-157(in Chinese).
- [7] 王佳贤,程浩忠,胡泽春. 多负荷水平下的配电网无功优化规划方法[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 56-61.
Wang Jiaxian, Cheng Haozhong, Hu Zechun. Optimal reactive power planning for distribution systems considering multi-load levels[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 56-61(in Chinese).
- [8] 赵俊光,王主丁,张宗益,等. 基于节点补偿容量动态上限的配电网无功规划优化混合算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 69-74.
Zhao Junguang, Wang Zhuding, Zhang Zongyi, et al. A dynamic upper limit to node compensation based hybrid optimization algorithm for reactive power planning in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 69-74(in Chinese).
- [9] 刘传铨,张焰. 电力系统无功补偿点及其补偿容量的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 79-81.
Liu Chuanquan, Zhang Yan. Confirmation of reactive power compensation node and its optimal compensation capacity[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 79-81(in Chinese).
- [10] 马世英,梁才浩,张东霞,等. 适用于大中城市电网的无功规划原则[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 49-53.
Ma Shiyong, Liang Caihao, Zhang Dongxia, et al. Reactive power planning principles suitable to power networks in large- and medium-size cities[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 49-53(in Chinese).
- [11] 黄镔,许婧,程旻,等. 220 kV 及以下电网感性无功补偿容量初探[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 148-151.
Huang Bin, Xu Jing, Cheng Min, et al. Preliminary study on the inductive reactive compensation capacity for power grids in 220 kV and lower voltage grades[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 148-151(in Chinese).
- [12] 张立,刘洪. 城市电网现状无功评价[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(2): 115-120.
Zhang Li, Liu Hong. Actual reactive power evaluation of urban power system[J]. Proceedings of Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation, 2009, 21(2): 115-120(in Chinese).
- [13] 中华人民共和国能源部. 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.
- [14] 国家电网公司. 电力系统电压质量和无功电压管理规定[S]. 北京: 国家电网公司, 2004.
- [15] 国家电网公司. 国家电网公司无功补偿配置技术原则[S]. 北京: 国家电网公司, 2004.



颜伟

收稿日期: 2011-01-28。

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;

田志浩(1988),男,硕士研究生,主要从事电力系统电压无功优化运行与控制研究;

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)