

# 配变低压无功补偿装置的运行状态评估指标体系

颜伟<sup>1</sup>, 陈思柔<sup>1</sup>, 沈海江<sup>2</sup>, 赵霞<sup>1</sup>, 余娟<sup>1</sup>

(1. 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, 重庆 400044; 2. 萧山供电局, 浙江 杭州 311202)

**摘要:** 由于配变低压侧负荷的不对称性及多样性, 基于简单导则规定及工程经验所设计的低压无功补偿装置很难满足配变负荷实时的无功补偿需求, 严重影响了无功补偿的调压降损效果。根据装置每日间隔 5 min 的三相量测数据, 建立一套配变低压无功补偿装置的运行状态评估指标体系, 其评估结果能够明确配变低压侧的电压无功问题及其原因, 可为控制策略及容量配置的优化规划提供决策依据。基于所建指标体系开发低压无功补偿装置的广域状态监测评估系统, 实际运行表明所提系统可取得良好的效果。

**关键词:** 配电网; 无功补偿; 变压器; 低压; 状态评估; 评估指标; 监测

**中图分类号:** TM 406

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.005

## 0 引言

在配变低压侧安装无功补偿装置可以提高电压质量、降低网损、改善功率因数<sup>[1]</sup>。低压配变量多面广, 其负荷具有时变性、多样性及三相不对称性。目前低压无功补偿装置的容量规划通常只针对低压配电网中少量选定的无功补偿点, 且只考虑一种典型日负荷曲线<sup>[2-3]</sup>。这种方法没有考虑城市电网中装置的普及性及各个配变负荷变化的多样性, 由此导致无功补偿不能满足实际负荷需求, 严重影响了调压降损效果。如何在线监测并有效评估低压无功补偿装置的运行状态及补偿效果、及时发现电压无功不合格的原因并调整装置的容量配置及控制策略, 已成为配电网无功管理智能化发展急需解决的一个关键问题。

低压无功补偿装置由多组电容器构成, 每组容量可以相同也可以不同, 可以三相同时投切也可以按相投切, 即“共补”和“分补”模式<sup>[4]</sup>。传统的低压电容器投切开关<sup>[5]</sup>主要为机械开关, 其开关合闸可能产生较大涌流, 对触点的损害大, 存在日投切次数限制。近年来, 电子式开关<sup>[6]</sup>逐步推广, 其开关合闸涌流小, 投切速度快, 不存在日投切次数限制。通常情况下, 低压无功补偿装置采用“无功”作为动作判据: 当无功负荷大于当前无功补偿量且超过某组电容器容量时则投入该组; 反之, 则切除该组。投切操作后经一定的延时(约 5 min)<sup>[7]</sup>才可以进行第二次操作。当电容器容量配置与控制策略设计存在缺陷时, 配变低压侧常存在欠/过补偿问题。机械开关电容器存在严重的频繁动作问题, 而电子式开关

电容器存在各组动作不均衡的问题。电容器在长期使用后存在明显的容量衰减问题<sup>[8]</sup>。目前装置中早期安装的机械开关电容器没有实时采集存储开关的动作信息, 要实现状态监测比较困难。而近年来安装电子式开关电容器能够采集开关动作的实时状态信息, 甚至有些还带有实时信息转发的通信接口, 为其在线状态监测与评估提供了可能<sup>[9-10]</sup>。

目前已有大量文献针对系统中一些重要设备建立了相关的状态评估指标体系<sup>[11-12]</sup>, 而在低压无功补偿装置的运行状态评估方面, 还没有直接相关的理论研究报道。电压无功运行导则和规定<sup>[13-15]</sup>中明确了各级电网电压和功率因数的合格水平以及无功补偿装置的容量配置原则, 由此可以评估电压无功运行状态是否合格。早期研究中提出了一套高压配电网的无功运行状态评估指标体系<sup>[16]</sup>, 该指标体系从补偿装置的容量配置和电压无功的控制能力两方面对高压配电网的无功运行状态进行评估。与其相比, 低压无功补偿装置的容量配置和控制策略更加复杂, 其中涉及共补电容器组(下文简称共补)和分补电容器组(下文简称分补)容量配置的充裕性、不同容量不同模式电容器组动作的协调性以及电容器容量衰减等新问题。因此, 为了保证低压无功补偿装置的补偿效果, 有必要建立合适的评估指标以全面充分反映其容量配置和控制中的各种问题。

本文充分考虑低压无功补偿装置的不对称运行特点, 从三相功率的对称程度、三相电压及无功的合格程度、三相电压及无功不合格的原因、电容器的容量衰减及其投切次数的均衡性 4 个方面建立了配变低压无功补偿装置的运行状态评估指标体系。然后, 结合实际工程项目的试点案例, 对相关指标的结果及其反映的实际问题进行了分析说明, 所得结论对于低压无功补偿装置的容量配置和控制策略的规划具有重要作用。

收稿日期: 2015-04-17; 修回日期: 2016-01-13

基金项目: 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课题(2007DA10512712203)

Project supported by Scientific Research Foundation of State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(2007DA10512712203)

# 1 配变低压无功补偿装置的运行状态评估指标

## 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。具体指标包括 4 类一级指标,分别是三相电压及无功的合格程度评估指标、三相功率的对称度评估指标、电压不合格/无功不足的原因追踪性评估指标、电容器组的容量衰减及投切次数的均衡性评估指标。每类一级指标包含两类二级指标。每类二级指标中包含多个三级指标。所有三级指标都以日为单位,是间隔 5 min、全天 288 个时刻的统计结果。其中的采样状态包括配变低压侧的三相电压幅值、三相有功和无功功率、每组电容器三相的电压、电流幅值及开关状态。

## 1.2 三相电压及无功的合格程度评估指标

为了全面评估低压无功补偿装置的电压无功调节效果,本文不仅考虑了配变低压侧三相电压及无功的合格率指标,而且考虑了其不合格的性质及程度的指标,即评估电压的偏高或者偏低以及无功的过补或者欠补的程度。

(1) 三相电压的偏低率/偏高率/合格率。

每日三相电压幅值合格点数占总点数的比例即为合格率,并用百分数表示。类似地,超下限或者超上限的不合格点数占总点数的比例即为偏低率或者偏高率。其中,电压幅值的合格范围由地方电力公司参考导则与实际系统确定。

(2) 三相无功的欠补率/过补率。

某相功率因数低于功率因数限值的时刻为该

相欠补偿时刻,无功负荷值与补偿量的差值为负的时刻为该相过补偿时刻。每日三相欠补偿的时刻数占总时刻数的比例即为欠补率,并用百分数表示。类似地,过补偿的时刻数占总时刻数的比例即为过补率。其中,功率因数限值也由地方电力公司参考导则与实际系统确定。

## 1.3 三相功率的对称度评估指标

为了更合理地规划分补的配置容量,本文考虑了三相负荷的对称度评估指标。具体指标有:三相有功负荷的最大/平均不对称度、三相无功负荷的最大/平均不对称度。其中,三相无功负荷最大不对称度可以为分补的单组容量配置提供决策依据。

某一时刻三相有功负荷的最大偏差值与电容器总容量的比值为该时刻的有功负荷不对称度,并用百分数表示。相应地,全天所有时刻的三相有功负荷不对称度的最大值为三相有功负荷最大不对称度,而平均值为三相有功负荷平均不对称度。类似方式可以定义三相无功负荷最大不对称度和平均不对称度指标。

## 1.4 电压不合格/无功不足的原因追踪性评估指标

(1) 电压不合格的原因追踪性指标。

配变低压侧无功补偿不足或过剩是造成电压不合格的一个重要原因。在补偿充足且不过剩的情况下,若电压仍不合格,则是由于上级电压偏低/偏高造成。因此,本文不仅考虑了由于欠补/过补造成的电压不合格的原因追踪性指标,还考虑了由于系统电压偏低/偏高造成的电压不合格的原因追踪性指标。

对无功不合格造成的电压不合格问题,定义了三相和单相的欠补电压偏低率及过补电压偏高率指

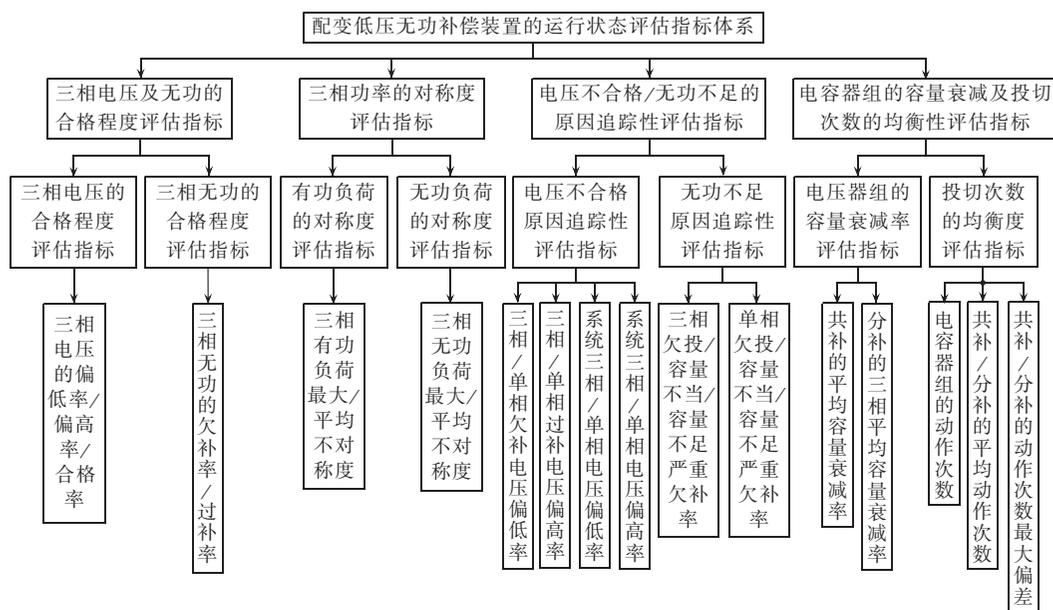


图 1 配变低压无功补偿装置的运行状态评估指标体系

Fig.1 Index system of operational status evaluation for reactive-power compensation device at low-voltage side of distribution transformer

标。其中,三相欠补电压偏低率为每日三相电压幅值均偏低且三相均欠补偿的时刻数占所有时刻数的比例,用百分数表示;每日除去三相欠补电压偏低时刻,单相电压幅值偏低且欠补偿的时刻数占所有时刻数的比例并用百分数表示为单相欠补电压偏低率。类似方式可以定义三相和单相过补电压偏高率指标。

对于上级系统电压不合格造成的配变低压侧电压不合格问题,配变低压侧功率因数合格时刻为既不欠补偿也不过补偿的时刻。本文将配变低压侧功率因数合格、电容器组全投而三相电压幅值均偏低的时刻称为系统三相电压偏低时刻;将配变低压侧功率因数合格、电容器组全切而三相电压幅值均偏高的时刻称为系统三相电压幅值偏高时刻。相应地,每日系统三相电压偏低的时刻数占总时刻数的比例即为系统三相电压偏低率,用百分数表示。类似原则,可以定义系统单相电压偏低率和三相/单相电压偏高率。

#### (2) 无功不足的原因追踪指标。

本文中的无功不足指配变低压侧欠补偿。无功不足的原因可能是补偿装置的容量配置不足,没有多余的电容器组可投;或是单组容量配置过大,没有合适容量的电容器组可投;或是控制策略不够完善,有合适容量的电容器组但没有投入。由于配变负荷的时变性很大,很可能出现功率因数越下限但欠补容量很小的情况。这种情况影响不大且难以避免与校正。为此,本文仅考虑了可以校正的无功严重不足问题。所谓严重不足,是指功率因数越下限且欠补容量超过电容器可选单组容量最小值的时刻。即当无功严重不足时,若有可投容量,则可以通过控制策略的完善增投一组电容器;若没有可投容量或没有合适的可投容量,可以通过扩容改造增加或者替换一组电容器,由此解决无功的严重不足问题。

本文充分考虑了低压无功补偿装置容量配置和控制的主要特点。通常情况下,共补和分补的单组容量都有多种选择。共补单组容量可以选择3 kvar、5 kvar、10 kvar、15 kvar及20 kvar等;分补单组容量可以选择3 kvar、5 kvar及10 kvar等。补偿装置的控制策略通常是:当三相无功欠补偿且欠补容量大于可选共补单组容量时,投入可选共补,当单相无功欠补偿且欠补容量大于可选分补单组单相容量时,投入可选该相分补。因此,若单组容量配置过大,则可能导致欠补功率很大时电容器组仍不动作;若容量配置不足,则可能导致欠补时没有可投的电容器组。为了区分容量配置不足和过大的现象,本文认为:当欠补容量小于电容器的单组可投容量,但不小于同类电容器组的最小可选单组容量时,当前时刻配置的单组容量过大;当所有电容器组投入时欠补无功功率仍不小于同类电容器组的最小单组可选容量时,当前容量

配置不足。如果全天状态监测统计中发现单组容量过大或不足累计持续时间超过1 h,则说明容量配置不合适的情况很突出,应该进行容量扩容或改造,否则可以忽略。

根据无功严重不足的原因本文定义了欠投严重欠补率、容量不当严重欠补率及容量不足严重欠补率评估指标,具体如下。

**a. 欠投严重欠补率**用于评估补偿装置的控制策略不当问题,包括共补、分补及共分补的欠投严重欠补率。若某时刻三相无功均严重不足且存在可投的共补没有投,则该时刻为共补欠投严重欠补偿时刻;此时投入可投共补后,若单相无功仍存在严重不足且该相分补可投却没投,则该时刻为共分补欠投严重欠补偿时刻;全天不考虑共补欠投严重欠补偿时刻,若某时刻单相无功严重不足且该相分补可投却没投,则该时刻为分补欠投严重欠补偿时刻。全天共补欠投严重欠补偿时刻数占总时刻数的比例即为共补欠投严重欠补率,用百分数表示。类似方式可以定义分补及共分补的欠投严重欠补率。

**b. 容量不当严重欠补率**用于评估补偿装置的单组容量配置过大问题,包括共补、分补及共分补的容量不当严重欠补率。若某时刻三相无功均严重不足并且欠补容量小于共补的单组可投容量但是不小于可选共补的最小单组容量,则该时刻为共补容量不当严重欠补偿时刻;此时投入不大于且最接近欠补容量的一组可选共补,若仍存在单相无功严重不足且欠补容量小于分补的单组单相可投容量但不小于可选分补最小的单组单相容量,则该时刻为共分补容量不当严重欠补偿时刻;全天不考虑共补容量不当严重欠补偿时刻,若某时刻单相无功严重不足且欠补容量小于分补的单组单相可投容量但不小于可选分补最小的单组单相容量,则该时刻为分补容量不当严重欠补偿时刻。全天共补容量不当严重欠补偿时刻数占总时刻数的比例即为共补容量不当严重欠补率,用百分数表示。类似方式可定义分补及共分补容量不当严重欠补率。

**c. 容量不足严重欠补率**用于评估补偿装置的总容量不足问题,包括共补、分补及共分补的容量不足严重欠补率。若某时刻三相无功均严重不足且投入所有可投电容器组后欠补容量仍不小于共补的最小单组可选容量,则该时刻为共补容量不足严重欠补偿时刻;此时投入不大于且最接近欠补容量的一组可选共补,若仍存在单相无功严重不足且投入所有可投电容器组后单相欠补容量仍不小于分补最小的单组单相可选容量,则该时刻为共分补容量不足严重欠补偿时刻;全天不考虑共补容量不足严重欠补偿时刻,若某时刻单相无功严重不足且投入所有可投电容器组后单相欠补容量仍不小于分补最小的单组单相可选

容量,则该时刻为分补容量不足严重欠补偿时刻。全天共补容量不足严重欠补偿时刻数占总时刻数的比例即为共补容量不足严重欠补率,用百分数表示。类似方式可以定义分补容量不足严重欠补偿时刻及其分补容量不足严重欠补偿时刻。

### 1.5 电容器组的容量衰减及投切次数的均衡性评估指标

在对装置的实时状态监测中发现,电容器组的容量衰减比较严重,仅投运 1 年多的补偿装置,容量衰减甚至超过了 15%。为此建立了电容器组的日平均容量衰减率指标以评估其容量衰减状况。另外,由于装置常采用阶梯容量方式配置电容器组,由此带来了电容器组之间动作次数不均衡的问题。为此建立了日动作次数均衡度指标以评估各电容器组的动作均衡程度。

#### (1) 电容器组的平均容量衰减率。

忽略电容器的有功损耗,电容器组的相电压与相电流的乘积为其单相投入无功容量的理论计算值。假设全天 288 个断面的单相投入无功容量理论计算值的平均值为电容器组的单相实际容量,则定义电容器组的单相平均容量衰减率为其单相实际容量与其额定容量的差值的绝对值占其额定容量的比例,用百分数表示。由于共补模式下,三相同投同切,因此不区分相别,按三相实际容量之和计算总容量的衰减率,即共补的平均容量衰减率。而对于分补模式,每相电容器的投切次数可能不同,因此需要进行区分,对应的容量衰减指标为分补的三相平均容量衰减率。

#### (2) 动作次数均衡度。

动作次数均衡度评估指标包括电容器组的动作次数、共补/分补的平均动作次数及共补/分补的动作次数最大偏差。

每日电容器组的动作次数总数即为电容器组的动作次数,共补按组统计、分补按相统计。每日同补偿模式所有电容器组动作次数的平均数即为平均动作次数,分为共补和分补的平均动作次数。每日同补偿模式所有电容器组动作次数的最大偏差相对其平均动作次数的百分数即为共补和分补的动作次数最大偏差。当共补或者分补模式的电容器只有一组时,则其平均动作次数等于动作次数,而动作次数最大偏差为 0。

## 2 算例分析

### 2.1 配变低压无功补偿装置的广域状态监测评估系统

广域状态监测评估系统是对低压无功补偿装置的运行状态进行实时监测和评估的一套软硬件系统,主要包括配变终端的信息采集系统及主站端的状态监测评估系统。信息采集系统只能安装在具有电子式开关电容器的配变终端上,主要功能是采集、存储并上传无功补偿装置的运行状态数据。采集时间间隔设定为 5 min,存储时间为 0.5 a。主站端的状态监测评估系统实时召测配变终端的数据并对数据进行存储、解析、计算及可视化显示,存储时间为 1 a。配变终端与主站端之间的数据传输采用 GPRS 的分组无线传输业务。

本文所使用的系统选取了萧山地区的 30 台低压无功补偿装置作为试点,进行了为期 0.5 a(2013 年 10 月至 2014 年 4 月)的实时状态监测和评估。运行状态和评估结果数据都存入配电网运维中心的数据库。依据国标及萧山区供电公司的相关规定,指标中配变低压侧三相电压幅值的上、下限值取 242 V 和 198 V;三相功率因数的限值取 0.9;共补单组可选容量有 3 kvar、5 kvar、10 kvar、15 kvar 和 20 kvar;分补单组可选容量有 3 kvar、5 kvar、10 kvar 和 20 kvar。

### 2.2 算例参数

本节采用配变名称命名其低压侧的无功补偿装置,选取具有代表性的 2013 年 10 月 25 日群力 4 号变、梅东村 9 号变和幸福村 3 号变的评估结果进行分析。无功补偿装置的容量配置如表 1 所示。电容器每组容量为三相容量之和。共补每组三相容量相等。

### 2.3 仿真结果

#### 2.3.1 配变低压母线电压偏高问题

幸福村 3 号变当日三相电压偏高率如表 2 所示。由表 2 可知幸福村 3 号变三相都存在电压偏高问题,其中 B 相电压偏高问题显著:偏高率为 10.82%,即每日约有 31 个时刻电压偏高,累计持续时间可达 2.5 h。表 3 给出电压偏高原因追踪性指标的评估结果。

由表 3 可知,幸福村 3 号变由于过补偿而造成的三相电压偏高率分别为 0.98%、3.74% 和 0.66%;由于系统上级电压偏高而造成的电压偏高率分别为

表 1 配变低压无功补偿装置的容量配置

Table 1 Capacity configuration of reactive-power compensation device at low-voltage side of distribution transformer

无功补偿装置	配变容量	共补 1	共补 2	共补 3	共补 4	共补 5	共补 6	分补 1A 相	分补 1B 相	分补 1C 相
群力 4 号变	400	20	20	5	10	10	20	3.33	3.33	3.33
梅东村 9 号变	250	5	10	10	20	20	20	3.33	3.33	3.33
幸福村 3 号变	160	5	10	20	20	0	0	3.33	3.33	3.33

表 2 幸福村 3 号变电压偏高率  
Table 2 Over-voltage rate of Xingfu village No.3 substation

无功补偿装置	电压偏高率/%		
	A 相	B 相	C 相
幸福村 3 号变	4.93	10.82	5.59

表 3 电压偏高原因追踪性指标评估结果  
Table 3 Evaluated cause-tracking index for over-voltage

过补电压偏高率/%				系统电压偏高率/%			
三相	A 相	B 相	C 相	三相	A 相	B 相	C 相
0.33	0.65	3.41	0.33	0.99	2.96	6.09	3.94

3.95%、7.08% 和 4.93%。由此可以看出,大部分时刻的电压偏高问题是系统上级电压偏高导致的。

2.3.2 电容器欠投问题

群力 4 号变当日电容器组的动作次数都为 0,三相欠补率及欠投严重欠补率如表 4 所示。

由表 4 可知,群力 4 号变当日三相欠补问题严重,欠补率约为 40%,即累计持续时间达到 9.6 h。由欠投严重欠补率可知共补没有及时投切是三相严重欠补偿的主要原因。电容器组没有及时投切的原因主要有 2 种:若是由于电容器再投入前的放电延时造成的,则需采用电容器组循环投切方式来避免;若是由于控制器失效等元件故障造成的,则需及时排查并维修。

2.3.3 电容器容量配置不当问题

梅东村 9 号变当日的三相欠补率及三相无功负荷的对称度评估结果如表 5 所示。容量不当严重欠补率及容量不足严重欠补率如表 6 和表 7 所示(表中容量不当严重欠补率简写为容量不当,容量不足严重欠补率简写为容量不足)。

结合表 5 的三相无功负荷对称度评估结果和表 1 的梅东村 9 号变电容器容量可得:三相无功负荷的最大偏差为 9.272 kvar,平均偏差为 2.774 kvar。平均偏差下 3.3 kvar 分补不动作,较大偏差下 3.3 kvar 分补不能满足要求。因此,各相 3.3 kvar 的分补不满足梅东村 9 号变的三相不对称无功负荷需求。

由表 5 的三相欠补率可知,梅东村 9 号变三相都存在欠补偿时刻且 C 相最严重、B 相次之,A 相可不予考虑。由表 6 和表 7 可以明确欠补偿产生原因:C 相分补容量配置不足,B 相分补容量配置不当,即单组分补容量配置过大。

结合上述结论可知:由于梅东村 9 号变三相无功

表 5 梅东村 9 号变欠补率及无功负荷的对称度评估结果  
Table 5 Under-compensation rate of Meidong village No.9 substation and evaluated symmetry index of reactive-power load

无功补偿装置	欠补率/%			三相无功负荷	三相无功负荷
	A 相	B 相	C 相	最大不对称度/%	平均不对称度/%
梅东村 9 号变	1.84	5.88	28.31	9.76	2.92

表 6 容量不当严重欠补率

Table 6 Serious under-compensation rate caused by incorrect capacitance

共补容量不当/%	共分补容量不当/%			分补容量不当/%		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0	0	0	0	0.37	5.15	0.74

表 7 容量不足严重欠补率

Table 7 Serious under-compensation rate caused by insufficient capacitance

共补容量不足/%	共分补容量不足/%			分补容量不足/%		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0	0	0	0	0	0.37	20.22

负荷偏差较大,3.3 kvar 对于 C 相无功负荷而言不足,对于 B 相却过大。因此,可以考虑根据各相无功负荷大小配置容量不等的分补。

幸福村 3 号变当日的三相欠补率及三相无功负荷的对称度评估结果如表 8 所示。容量不当严重欠补率及容量不足严重欠补率如表 9 和表 10 所示。

结合表 8 的三相无功负荷对称度评估结果和表 1 的幸福村 3 号变电容器容量可得:三相无功负荷的

表 8 幸福村 3 号变欠补率及无功负荷的对称度评估结果  
Table 8 Under-compensation rate of Xingfu village No.3 substation and evaluated symmetry of reactive-power load

无功补偿装置	欠补率/%			三相无功负荷	三相无功负荷
	A 相	B 相	C 相	最大不对称度/%	平均不对称度/%
幸福村 3 号变	22.70	30.59	22.50	9.30	2.02

表 9 容量不当严重欠补率

Table 9 Serious under-compensation rate caused by incorrect capacitance

共补容量不当/%	共分补容量不当/%			分补容量不当/%		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
5.59	0	0	0	9.87	10.20	13.82

表 10 容量不足严重欠补率

Table 10 Serious under-compensation rate caused by insufficient capacitance

共补容量不足/%	共分补容量不足/%			分补容量不足/%		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0	0	0	0	1.97	0	0.66

表 4 群力 4 号变欠补率及欠投严重欠补率

Table 4 Under-compensation rate of Qunli No.4 substation and serious under-compensation rate caused by under-capacitance

无功补偿装置	欠补率/%			共补欠投/%	共分补欠投/%			分补欠投/%		
	A 相	B 相	C 相		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
群力 4 号变	40.59	40.96	40.59	26.48	0.84	2.30	0.97	0	0.37	0

最大偏差为 6.048 kvar, 平均偏差为 1.312 kvar。平均偏差下 3.3 kvar 分补不动作, 较大偏差下 3.3 kvar 分补不能满足要求。因此, 各相均为 3.3 kvar 的容量配置也不适宜幸福村 3 号变的无功负荷需求。

由表 8 的三相欠补率可知, 幸福村 3 号变三相都存在欠补偿问题且 B 相最严重, A、C 相次之。由表 9 和表 10 可以看出, 所有电容器组都存在长时间单组容量配置过大的问题。其次 A 相和 C 相分补还有短时间容量配置不足的问题。因此, 可以适当降低所有电容器组的单组容量, 避免容量配置过大造成的电容器组不动作问题; 增加分补的配置组数从而满足 A 相和 C 相短时间较高的无功需求。

### 2.3.4 电容器容量衰减及动作不均衡问题

幸福村 3 号变当日电容器组的平均容量衰减率如表 11 所示, 投切次数的均衡性指标评估结果如表 12 所示。因为只含有 1 组分补, 所以不计分补的动作次数最大偏差。

表 11 幸福村 3 号变电容器组的平均容量衰减率

Table 11 Average capacity fading rate of capacitor banks of Xingfu village No.3 substation

无功补偿装置	平均容量衰减率/%						
	共补 1	共补 2	共补 3	共补 4	分补 1 A 相	分补 1 B 相	分补 1 C 相
幸福村 3 号变	18.96	17.09	13.78	0	9.12	0	0

表 12 电容器组投切次数的均衡性指标评估结果

Table 12 Evaluated equilibrium index for action times of capacitor banks

动作次数							共补平均动作次数	共补动作次数最大偏差/%
共补 1	共补 2	共补 3	共补 4	分补 1 A 相	分补 1 B 相	分补 1 C 相		
76	17	1	0	9	0	0	23.5	323

表 11 中当日不动作的电容器组容量衰减率为 0, 其余电容器组都存在一定程度的容量衰减。该无功补偿装置从 2012 年 6 月投运至 2013 年 10 月, 共补的单组容量衰减率达到 10%~20%, 分补的接近 10%。电容器的容量衰减导致实际投切无功值与理想值有一定差别, 需要在无功补偿装置的运行与规划中考虑电容器随时间的容量衰减。

结合表 1 各个电容器组的额定容量及表 12 电容器组的动作次数可知, 不同容量的共补动作次数差别较大。其中, 共补 1(5 kvar)动作频繁, 共补 2(10 kvar)的动作次数不多, 共补 3 和 4(20 kvar)几乎不动作。由此可知, 幸福村 3 号变三相无功负荷普遍偏低, 单组容量大的共补利用率低。这一结论与 2.3.3 节中幸福村 3 号变所得结论一致。

## 3 结论

本文提出了一套配变低压无功补偿装置的运行

状态评估指标体系, 该指标体系从三相电压及无功的运行状态、三相功率的对称程度、电压不合格/无功不足的原因以及电容器投切与衰减状态 4 个方面全面精细化地评估了配变低压无功补偿装置的运行状态。基于上述指标体系开发的一套广域状态监测评估系统已成功试点应用于萧山地区的低压配电网。系统试点运行中发现了低压无功补偿装置在容量配置及运行方面的一些典型问题, 这对于实际电力部门进行补偿装置容量的优化规划和控制策略的完善起到重要作用。

实际系统中大量使用的低压无功补偿装置缺乏实时状态监测和评估, 其容量配置的不合理及控制的失效问题未得到及时发现和解决, 严重影响了补偿装置调压降损作用的发挥。本文所提指标及系统为解决上述问题提供了一条有效的途径。系统的初步工程实践显示出其具有广泛的推广应用前景。

### 参考文献:

- [1] 胡泽春, 钟明明, 王佳贤, 等. 考虑多负荷水平的中低压配电网无功补偿优化规划[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 167-173. HU Zechun, ZHONG Mingming, WANG Jiaxian, et al. Optimal reactive power compensation for medium and low voltage distribution network considering multiple load levels[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 167-173.
- [2] 孙毅, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 基于有记忆的模拟退火算法的配电网电容器优化配置[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 21-24. SUN Yi, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal capacitor placement in radial distribution system based on simulated annealing with memory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 21-24.
- [3] 张程, 王主丁, 张宗益, 等. 多负荷水平下配电网电容器优化配置算法[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 85-89. ZHANG Cheng, WANG Zhuding, ZHANG Zongyi, et al. An algorithm for optimal configuration of capacitors in distribution network under multi-load levels[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 85-89.
- [4] 景翔, 陈歆竹, 吴杰. 三相不平衡系统的无功补偿控制[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 1-3. JING Xiang, CHEN Xinji, WU Jie. Reactive power compensation of unbalanced three-phase system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 1-3.
- [5] 葛锁良, 袁业剑, 于敏华. 一种新型可连续调节的无功补偿装置[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 100-102. GE Suoliang, YUAN Yejian, YU Minhua. Reactive power compensator with continuous regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 100-102.
- [6] 翁海霞, 赵建国, 孙树敏. 瞬时无功理论在快速动态无功补偿装置中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 116-118. WENG Haixia, ZHAO Jianguo, SUN Shumin, et al. Application of instantaneous reactive theory in dynamic var compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 116-118.
- [7] 汤继东. 中低压电气设计与电气设备成套技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 403.

- [8] 樊红杰. 金属化薄膜电容器容量衰减的解决方案[J]. 电子元件与材料,2011,30(9):40-42.  
FAN Hongjie. Design and optimization of capacitance decay program for metallized film capacitors[J]. Electronic Components and Materials,2011,30(9):40-42.
- [9] 李珊,张大立,李克文,等. 一种新型低压无功补偿成套装置自动检测系统[J]. 科技资讯,2013,20(10):125-129.  
LI Shan,ZHANG Dali,LI Kewen,et al. Automatic detection system of a new type of low voltage reactive power compensation equipment[J]. Science & Technology Information,2013,20(10):125-129.
- [10] CAROLINA F,MIHAEL M. Trends in the development of communication networks:cognitive networks[J]. Computer Networks,2010,53(9):1354-1376.
- [11] 巫伟南,杨军,胡文平,等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):129-134.  
WU Weinan,YANG Jun,HU Wenping,et al. Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):129-134.
- [12] 徐岩,陈昕. 基于合作博弈和云模型的变压器状态评估方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):88-93.  
XU Yan,CHEN Xin. Transformer status assessment based on co-operative game and cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):88-93.
- [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:SD 325—1989[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力管理规定:国家电网生[2004]203号[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:国家电网生[2004]435号[S]. 北京:国家电网公司,2004.
- [16] 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.

## 作者简介:



颜伟

颜伟(1968—),男,四川眉山人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与优化控制(E-mail:cquyanwei@163.com);

陈思柔(1990—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统无功优化运行与控制(E-mail:csirou@163.com)。

## Index system of operational status evaluation for reactive-power compensation device at low-voltage side of distribution transformer

YAN Wei<sup>1</sup>,CHEN Sirou<sup>1</sup>,SHEN Haijiang<sup>2</sup>,ZHAO Xia<sup>1</sup>,YU Juan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University,Chongqing 400044,China;2. Xiaoshan Power Supply Bureau,Hangzhou 311202,China)

**Abstract:** Due to the asymmetry and diversity of load at the low-voltage side of distribution transformer, the low-voltage reactive-power compensation device designed based on simple guidelines or engineering experiences can hardly meet the real-time reactive-power compensation demand, seriously influencing its voltage-regulation and loss-reduction effect. An index system of operational status evaluation for reactive-power compensation device at low-voltage side of distribution transformer is built according to the three-phase data measured every 5 min, by which, the voltage and reactive-power problems at the low-voltage side of distribution transformer and their causes can be identified, providing the references for the optimal planning of control strategy and capacity configuration. A wide-area status monitoring and evaluation system for low-voltage reactive-power compensation device is developed based on the proposed index system and its practical operation shows its perfect performance.

**Key words:** distribution network; reactive-power compensation; electric transformers; low-voltage; status evaluation; evaluation index; monitoring