

基于WAMS/SCADA混合量测的机组一次调频综合分析与精益化评价方法

提出了一种基于WAMS与SCADA混合数据和机组广域量测信息的一次调频综合分析与评价方法。该方法基于机组广域量测信息,采用在线监测与在线测试相结合的方式,辨识频率波动不同时段内的机组一次调频特性参数与贡献效果,然后依据出力响应指数、分段电量贡献指数和综合指数等多种评价指标,量化评价不同时段内的机组一次调频性能,建立机组一次调频精益化评价体系。所述方法在江苏电网发电机组一次调频性能评价工作中得到了实际应用,取得了良好的应用效果。

刘栋¹ 王波¹ 苏大威² 徐瑞¹ 钱玉妹^{2/1}. 1. 国电南瑞科技股份有限公司 2. 国网江苏省电力公司

全失去一次调频功能。因此,如何综合分析及精益化评价机组实际一次调频性能,促进和提高机组一次调频的投入率和使用率,增加电网的运行质量和稳定性具有重要意义。

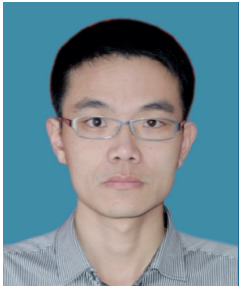
近年来,基于全球卫星定位系统(GPS)技术的同步向量测量技术不断成熟和发展^[3],从根本上解决了不同空间位置的数据同步采集问题,实现了机组广域量测信息的同步采集,为机组一次调频性能在线监测与分析提供了新的契机。文献^[4]以调频死区和调差系数作为监测对象,文献^[5]以一次调频贡献电量为主要性能评价指标,文献^[6]以响应速度、调整幅度、调整偏差和响应指数为综合评价指标,上述分析方法多基于机组出力和频率变化特征曲线来评价机组一次调频性能,具有工程实用性,但机组一次调频受机组运行工况等因素影响,响应性能具有较大的动态特性,同时单纯的一次调频在线监测方法也无法对频率扰动期间停运机组进行一次调频性能分析,因此所得到的一次调频性能评价指标,不能完全反映机组一次调频真实效果。另一方面,WAMS中的PMU由于具有区域分布不完全性及其量测数据有限性等问题,使得完全基于WAMS数据将难以实现完整、全面地全网机组一次调频性能分析与评价,因此针对分析数据局限性的问题,必须采取一些补偿措施来对可疑数据、布点缺失数据等进行处理。

因此,本文基于WAMS与SCADA混合数据和机组广域量测信息,提出了一

0 引言

一次调频是指当电网频率(周波)偏离额定值时,电网中机组调节控制系统自动地控制机组有功功率的增加(频率下降时)或减小(频率升高时),以限制电网频率变化的特性。机组一次调频功能是电力系统有功功率和频率的调整与控制的重要环节^[1-2],反映了电网在负荷突发事件中的应急能力,对于电力系统安全稳定运行有着关重要的作用。

目前国家电网正处于特高压电网建设过渡期,交直流电网连锁效应显著,电网面临着更为严峻的安全形势,仅2015年就发生数次直流闭锁电网事故,“9.19”事故中电网最低频率跌至49.563 Hz,严重影响了电网的安全稳定运行,而火电机组多采取DEH+CCS方式实现一次调频功能,很多机组的DEH和CCS中的一次调频回路通过人为操作进行逻辑修改或投切操作,使得机组不能正常发挥或完



刘栋/工程师

关键词/Keywords

发电机组·
一次调频·
WAMS·
SCADA·
综合分析·
精益化评价·

次调频性能综合分析与精益化评价方法,建立了结合一次调频在线监测与一次调频在线测试的一次调频考核评价系统,并将其应用于实际的机组一次调频性能在线监测与评价,取得了良好的效果。

1 一次调频性能评价指标及分析方法原理

1.1 综合性能评价指标

机组的一次调频性能传统上用汽轮机调速系统的速度变动率(调差系数)及迟缓率(死区)来表示。这两个指标反映的是发电机组的固有特性,而要反映发电机组的调节性能,目前国内各区域“发电厂并网运行管理实施细则”主要采用以下几个指标:一次调频投运率、一次调频贡献电量和速度变动率等。

然而从电网实际稳定运行角度考虑,一次调频过程初始时段应追求快速性和有效性,快速将频率调整至限定范围内;后期应追求无偏性,保证频率平稳变化^[6]。本文综合一次调频在不同时段的性能需求,提出依据出力响应指数、分段电量贡献指数和综合指数等多种评价指标,从调节速度、调节幅度、调节精度和一次调频综合响应等维度对机组一次调频性能进行综合分析与评价。

主要相关性能指标:

(1) 调节速度指数 I_s (%)

电网频率变化达到一次调频动作值到机组负荷开始向频率恢复方向变化所需的时间,称为响应滞后时间,响应滞后时间反映了机组一次调频响应的快慢程度,因此,可通过响应滞后时间对调节速度指数 I_s 进行量化,而在江苏电网一次调频考核过程中为了更加充分体现机组一次调频初始时段的快速性和有效性,则通过一次调频初始时段内一次调频实际贡献电量占理论贡献电量的百分比对调节速度指数 I_s 进行量化。

$$I_s = \frac{H}{H_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中, H 为一次调频初始时段实际贡献电量; H_c 为一次调频初始时段理论贡献电量。

(2) 调节幅度指数 I_r (%)

电网频率变化达到一次调频动作值后,机组负荷需要跟随频率的变化进行精确调整,为了将频率快速调整至死区内,机组负荷需要快速调节

到一定的幅度。因此,可通过机组一次调频应动作时段内,机组实际最大出力调整量占理论最大出力调整量的百分比对调节幅度指数 I_r 进行量化。

$$I_r = \frac{X_1}{y_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, X_1 为机组实际最大出力调整量; y_1 为机组理论最大出力调整量。

(3) 调节精度指数 I_c (%)

机端频率变化超过一次调频死区下限(或上限)开始,机组一次调频应动作时段内,有功发电量比频率不超过一次调频死区下限(或上限)情况下的发电量多出(或减少)的部分,称为一次调频贡献电量,反映了机组在参与一次调频过程中对负荷扰动的贡献。因此,调节精度指数 I_c 可用机组一次调频应动作时段内,机组一次调频实际贡献电量占理论贡献电量的百分比进行表示。

$$I_c = \frac{P}{P_c} \times 100\% \quad (3)$$

式中, P 为一次调频实际贡献电量; P_c 为一次调频理论贡献电量。

(4) 综合响应指数 I_e (%)

根据调节速度、调节幅度、调节精度各分量及其权重系数计算得到的综合反映机组一次调频响应性能的综合指数,可根据各区域电网的负荷特性及“发电厂并网运行管理实施细则”考核标准进行设定,江苏电网是选择取调节幅度指数和调节精度指数进行综合分析与考核。

$$I_e = (\text{权重系数}) \times I_r + (\text{权重系数}) \times I_c (\text{权重系数}) \times I_s \quad (4)$$

1.2 综合分析与精益化评价方法原理

本文采取了以一次调频性能在线监测为主,在线测试为辅,两者相结合的方式对机组一次调频进行综合分析与精益化评价。一次调频性能在线监测反映了实际机组一次调频性能,一次调频性能在线测试实现了事后机组一次调频性能的在线分析,提高了机组考核的全面性和精确性。在线监测与在线测试两者相辅相成,完善了一次调频考核评价功能。

机组一次调频性能在线监测和在线测试功能首先通过智能电网调度技术支持系统实时获取当前断面WAMS数据和SCADA数据,通过时标对齐、修正和分段拟合等数据预处理方法,获得

WAMS和SCADA混合数据，并动态监视电网频率变化过程，捕捉电网频率有效扰动，辨识频率波动不同时段内的机组一次调频特性参数与贡献；其次，结合频率波动不同时段的一次调频特性，依据出力响应指数、分段电量贡献指数和综合指数等多种评价指标，量化评价不同时段内的机组一次调频性能，综合分析并精益化评价机组一次调频性能，建立机组一次调频精益化评价体系。机组一次调频性能综合分析并精益化评价方法原理流程图如图1所示。

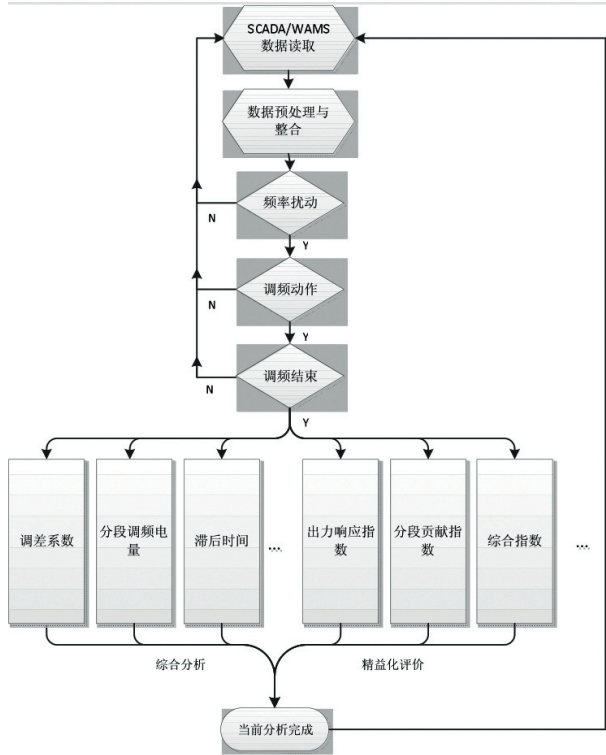


图1 一次调频方法原理流程图

2 WAMS和SCADA数据预处理

基于全球卫星定位系统（GPS）技术的同步相量测量单元（PMU）实时采集电网内机组的电压、电流等相量及功率、频率等模拟量，并以25~100帧/秒的速率实时上送至广域测量系统（WAMS）主站^[3]，而PMU在数据采集及数据传输过程中可能存在一些随机干扰和偶然故障，因此WAMS数据中可能存在可疑数据和缺失数据；另一方面，由于WAMS中PMU区域分布的不完全性及其量测数据的有限性，可导致部分机组数据整体缺失。可疑数据和缺失数据对基于WAMS数据一

次调频性能在线分析与评价会造成很大的影响，必须采取一些WAMS数据补偿措施对可疑数据和缺失数据进行处理。

2.1 可疑数据处理

可疑数据是指WAMS中可能存在一些数据品质异常或明显偏离曲线正常变化轨迹的数据。可疑数据处理首先通过PMU数据质量码校验，对GPS失步、数据不可用和装置异常等质量码异常的数据进行过滤，其次通过幅值限制，对机组有功和频率进行过滤，例如：当前机组有功超出机组出力限值的1.5倍或当前频差超过0.8 Hz，即可认为机组数据可疑，最后将可疑点用相邻有效点作拟合或插值自动修复，以提高数据利用率。高密度采样的PMU量测数据抖动比较明显，如机组出力相邻两帧间跳变量有时甚至超过1 MW，甚至更大，需利用均值滤波消抖获得量测数据的变化趋势。图2为滤波前后的机组数据，蓝色虚线表示滤波后的机组出力。

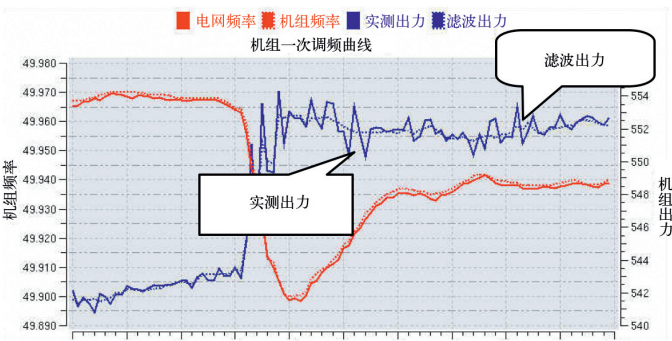


图2 机组一次调频曲线

2.2 缺失数据处理

缺失数据是指个别采样点的数据缺失或所需数据PMU并未采集。个别采样点丢失时可采用相邻有效点作拟合或线性插值等方法进行补充；所需数据PMU未采集时可采用SCADA数据进行分段拟合的方法进行补充。文献[7]比较了WAMS与SCADA数据曲线的相似程度和实时差异，发现同一物理测点，直采SCADA数据与PMU数据延迟小于1 s，有功值差异小于2%居多，因此可通过智能电网调度技术支持系统实时获取当前WAMS对齐时标和SCADA数据，进行数据的时标对齐、修正和分段拟合，并对缺失数据进行补充。

3 一次调频性能综合分析与精益化评价

本文采用前面提出的基于WAMS与SCADA混合数据源的机组一次调频性能分析方法原理，动态监视电网频率变化过程，捕捉电网频率的有效扰动，综合分析频率波动不同时段内的机组一次调频特性参数与贡献效果，并主要依据出力响应指数、分段电量贡献指数及综合指数等多种评价指标，对机组一次调频性能进行综合分析。

而由于机组一次调频性能受机组运行工况等因素影响，响应性能具有较大的动态特性，每一次计算所得的特性参数可能并不相同，有时甚至相差很大，不能简单地使用某一次数据作为其性能评价的依据，需要结合长期积累的多次性能分析统计结果进行整体考核。因此，本文提出在时间维度上精益化一次调频评价体系，该评价体系分为实时评估指标和长期统计指标两大类。

3.1 实时评估指标

实时评估指标是从单次表现的角度评价机组一次调频性能。依据单次机组调频性能计算结果，对调节速度、调节幅度和调节精度相关性能指标加权融合得到综合评估指标实现一次调频性能的综合评价，并根据指标所在的区间，设定评语集， $V=\{\text{优秀, 良好, 中等, 合格, 不合格, 反调节}\}$ ，评价机组一次调频性能。实时评估指标主要包括响应滞后时间、出力响应指数、电量贡献指数和综合指数。

3.2 长期统计指标

长期统计指标是从长期表现的角度评价机组一次调频性能。依据多次机组一次调频性能计算结果，对一次调频性能进行长时段统计，并根据综合评估指标实现一次调频性能的综合评价。统计指标包括平均调节速度、平均调节幅度、评价调节精度、综合响应指数、效扰动次数和考核次数、优秀次数等。

4 一次调频性能在线测试

机组一次调频性能在线监测功能能够在线捕捉并实时分析反映机组在实际运行环境下的一次调频性能响应，但无法对频率扰动期间停运机组进行一次调频性能分析，一次调频考核缺乏全面性；另一方面，一次调频性能在线监测功能有

可能会遇到严重可疑数据和缺失数据的干扰，尤其在频率偏离标准频率较远时一次调频调节量和AGC调节量会叠加在一起，对一次调频性能在线分析结果产生影响，因此，针对上述情况本文提出结合机组一次调频性能在线测试功能完善补充机组一次调频性能分析评价的方法。

一次调频性能在线测试基于调度侧和电厂侧约定的测试交互机制，主站以遥控指令下发方式，下发一次调频投入、退出和各类型测试指令，子站接收到相应指令后模拟系统低频或高频工况的一次调频动作情况，实现一次调频增/减测试、连续增/减测试和特性参数测试功能。考虑到子站RTU数据采集的时效性较差问题，采用RTU和PMU双数据源并行处理的测试方式，通过对基础数据和测试结果的分析校验，准确掌握机组一次调频动作时间和动作功率，以确保测试结果的准确性。图3为一次调频性能在线测试时机组响应曲线，蓝色曲线为实际机组出力曲线。

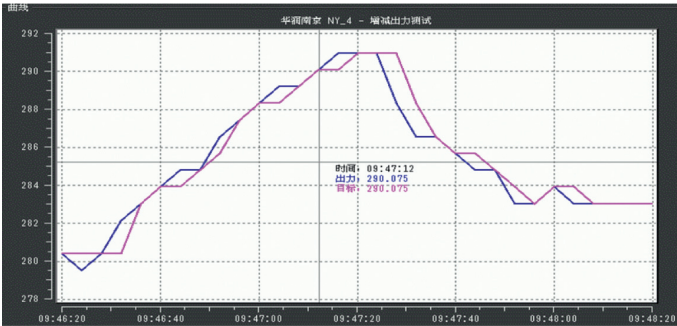


图3 基于PMU数据的一次调频在线测试

5 现场应用

利用上述原理和方法，国电南瑞科技股份有限公司基于智能电网调度技术支持系统开发了基于WAMS/SCADA混合量测的机组一次调频综合分析与精益化评价软件，目前已在江苏电网进行了实际应用。

具体现场应用实例：2015年10月20日03时05分华东电网出现直流单极闭锁故障，致使电网频率10 s内跌至49.764 Hz，一次调频性能在线监测与评价软件捕获到了此次频率扰动，分析计算得到的一次调频性能与实际动作情况基本一致。图4为大唐南京#2号机组基于PMU数据的一次调频性

能分析与评价结果, 图5为大唐南京#2号机组基于RTU数据的一次调频性能分析与评价结果。

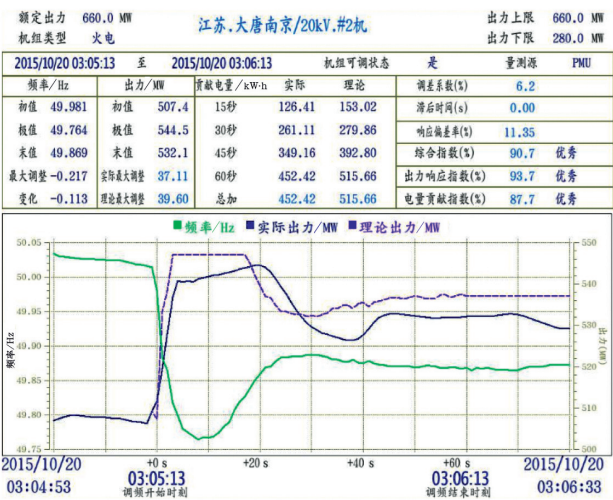


图4 基于PMU数据的机组一次调频分析与评价结果

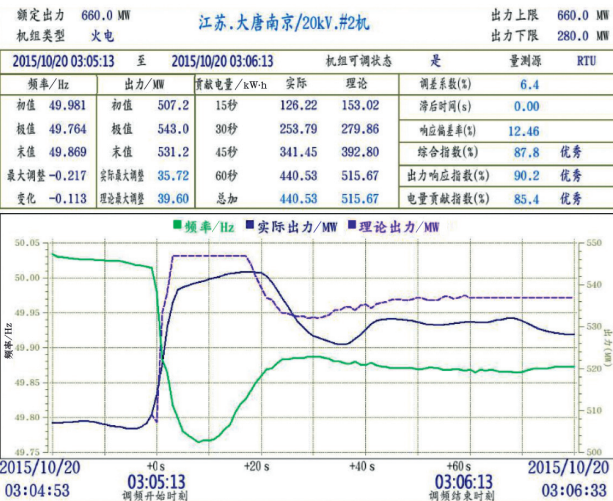


图5 基于RTU数据的机组一次调频分析与评价结果

由图4和图5可以看出一次调频过程中的机组实际出力曲线与理论出力曲线拟合程度高, 说明机组一次调频性能较好。表1中分别基于WAMS/SCADA计算得到调节速度指数、调节幅度指数、调节精度指数及一次调频响应指数基本一致, 实时评估指标反映情况也与实际动作情况一致, 说明了大唐南京#2号机组一次调频性能单次表现较好。而表2中分别记录大唐南京#2号机组9月份和10月份长期指标统计结果, 从该表的结果可以看出大唐南京#2号机组一次调频性能长期表现较好。

表1 机组一次调频实时评估指标

机组	容量/MW	调节速度(%)	调节幅度(%)	调节精度(%)	综合指数(%)	备注
#2机	660	82.6	93.7	88.9	90.7	PMU数据
#2机	660	82.4	90.2	86.9	87.8	RTU数据

表2 机组一次调频长期统计指标

机组	容量/MW	调节速度(%)	调节幅度(%)	调节精度(%)	综合指数(%)	备注
#2机	660	83.2	93.4	79.5	86.5	10月份
#2机	660	73.1	79.5	79.7	79.6	9月份

同时, 事后江苏电网公司基于PMU数据对大唐南京#2号机组一次调频性能进行了在线测试。表3中记录了大唐南京#2号机组一次调频在线测试计算得到实时评估指标, 指标评价结果与在线监测评价结果一致。

表3 机组一次调频测试指标

机组	容量/MW	调节速度(%)	调节幅度(%)	调节精度(%)	综合指数(%)	备注
#2机	660	86.2	95.4	90.1	92.8	在线测试

实时评估指标和长期统计指标综合表明大唐南京#2号机组一次调频表现较好, 与历次实际动作情况和定期测试结果一致。由此可见, 基于WAMS/SCADA混合量测的机组一次调频综合分析与精益化评价方法能够准确地评价机组一次调频效果。

6 结束语

本文基于WAMS与SCADA混合数据和机组广域量测信息实现了机组一次调频的综合分析与评价, 该方法能够客观、全面分析与评价异质机群在频率波动不同时段内的一次调频性能, 评价结果真实、可靠, 能够正确反映一次调频系统实际动态响应情况, 所得性能参数与评价指标可作为一次调频系统性能评估的重要参考。

参考文献

[1] 何仰赞, 温增跟. 电力系统分析[M]. 3版. 武汉: 华 (下转第511页)

[J]. 广东电力, 2005; 18(8): 34-36.

[4] 任丽佳. 基于导线张力的动态提高输电线路输送容量技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

[5] DL/T5092. 110 kV架空送电线路设计技术规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[6] 张启平, 钱之银. 输电线路实时动态增容的可行性研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 31-32.

[7] 戴沅, 聂耸, 程养春. 输电线路动态增容载流量计算模型综述[J]. 广东电力, 2012, 25(11): 51-56.

[8] 钱之银. 提高华东电网500 kV输电线路输电容量的研究[J]. 华东电力, 2003(6): 339-341.

[9] Holbert KE, Heydt GT. Prospects for dynamic transmission circuit ratings[J]. In Proceedings IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Sydney, NSW, 2001(3): 205-208.

[10] Adapa R, Douglass DA. Dynamic thermal ratings: Monitors and calculation methods[C]. In Proceedings of the Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa, Durban, South Africa, 2005: 163-167.

[11] Foss SD, Lin SH, Fernandes RA. Dynamic thermal line ratings: Part 1: Dynamic ampacity rating algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1983, 102(6): 1858-1864.

[12] 叶自强, 朱和平. 提高输电线路输送容量的演技[J]. 中国电网技术, 2006, 30(9): 258-263.

[13] 黄新波, 孙钦东. 输电线路实时增容技术的理论计算与应用研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1138-1144.

[14] 廖添泉. 提高输电线路输送容量研究[D]. 成都: 西华大学, 2009.

[15] 杨鹏, 房鑫炎. 采用 DTCR 模型提高输电线路输送容量[J]. 华东电力, 2005, 33(3): 11-14.

[16] 张辉. 运行条件下输电线路热载荷能力研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.

[17] Douglass DA. Field studies of dynamic thermal rating methods for overhead lines[C]. In Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, New Orleans, USA, 1999, 2: 842-851.

[18] 毛先胤. 动态提高输电线路输送容量监测系统及其因更用分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

作者简介

汪鹏 (1985-), 男, 本科, 工程师, 从事变电一次设备工作。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**
(编辑: 崔文静)

(上接第484页)

华中科技大学出版社, 2002.

[2] 戴义平, 赵婷, 高林. 发电机组参与电网一次调频的特性研究[J]. 中国电力, 2006, 39(11): 37-41.

[3] 罗建裕, 王小英, 鲁庭瑞, 等. 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 78-80.

[4] 郑涛, 高伏英. 基于PMU的机组一次调频特性参数在线监测[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 57-61, 71.

[5] 李端超, 陈实, 陈中元, 等. 发电机组一次调频调节效能实时测定及补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 70-72.

[6] 张艳军, 高凯, 曲祖义. 基于发电机出力曲线特性的一次调频性能评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 99-102.

[7] 齐文斌, 肖晓春, 李东平, 等. 调度中心SCADA与WAMS实时数据的差异. 南方电网技术, 2013, 7(5): 87-90.

作者简介

刘栋 (1983-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电网调度自动化分析与控制技术。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**
(编辑: 崔文静)