

DOI: 10.7667/PSPC160863

基于综合分析方法的变压器故障诊断技术与软件开发

吕守国¹, 崔玉新², 冯迎春¹, 管有为¹

(1. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250118; 2. 山东山大世纪科技有限公司, 山东 济南 250118)

摘要: 针对当前单一的分析方法难以全面诊断变压器各种可能存在的故障类型, 采用综合分析方法进行变压器故障诊断。研发变压器光谱气体采集和分析系统, 得到各种气体含量; 进而采用改良三比值法、大卫三角形法和立方体图示法三种综合方法进行变压器故障诊断。开发了基于综合分析方法的变压器诊断分析软件。该故障诊断软件包含运行状态、历史数据、谱图和数据与诊断四大功能模块。现场应用证明了基于综合分析方法的变压器故障诊断技术的有效性。

关键词: 变压器; 故障诊断; 改良三比值法; 大卫三角形法; 立方体图示法

Transformer fault diagnosis method based on comprehensive analysis and its software development

LÜ Shouguo¹, CUI Yuxin², FENG Yingchun¹, GUAN Youwei¹

(1. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company, Jinan 250118, China;
2. Shandong Shanda Century Technology Company, Jinan 250118, China)

Abstract: The current single analytical method is difficult to fully diagnose a variety of transformer fault types that may all exist. This paper proposes the integrated use of three classic transformer fault diagnosis. Transformer spectral gas analysis system is introduced to get all kinds of gas first. Then the integrated use of three classic transformer fault diagnosis, including improved three-ratio method, Duval Triangle method and cube graphic method, is applied. The fault diagnosis software that is based on comprehensive analysis method is developed. The fault diagnosis software includes four functional modules, i.e. running state, historical data, diagnostic data and spectra. And the field application proves the validity of transformer fault diagnosis based on the comprehensive analysis.

Key words: transformer; fault diagnosis; improved three-ratio method; David triangle method; cube graphic method

0 引言

目前运行中的大型电力变压器, 绝大多数是用变压器油来浸渍, 以提高其绝缘性能和散热性能。当前国内常用的 10、25 或 40 号变压器油, 均由石油中提炼出来的碳氢化合物(主要区别是凝固点不同)。变压器油与绝缘纸一样都是有机绝缘材料^[1], 在热、电、氧、水等多种因素作用下, 分解出氢、一氧化碳以及多种烃类气体, 这些气体大部分溶解在油中。当存在过热或局部放电等潜伏性绝缘缺陷时, 就会加快这些气体的产生速度。设备内部故障的类型及严重程度与这些气体分子的组成及产气速率有着密切关系, 利用这一关系判断设备内部故障和监视设备的运行状况, 成为充油电气设备安全运行不可缺少的手段, 在国内外普遍推广使用。

国际电工委员会制定了专门的油中溶解气体分

析导则 IEC567 和 IEC599, 国内也制定了 GB17623 和 DL722 相关标准。因此, 分析油中溶解的各种气体含量, 就能尽早发现设备内部存在的潜伏性故障并可随时掌握故障的发展情况。因此, 能进行多份气体含量的 DGA(Dissolved Gases Analysis 油中溶解气体分析)在线监测成为 220kV 及以上等级变压器油气监测的发展方向。

1 光谱分析系统

精确地获取变压器现场运行中各种气体的含量, 是变压器准确诊断的基础。当前变压器故障诊断研究都假设已经获得了各种气体含量这一重要前提, 但在变压器实际运行过程中, 由于电力现场状况的非理想化, 如何准确、便捷地获得变压器运行中的各种气体含量, 是变压器故障诊断的难点之一。

光谱气体分析系统通过分析激光被气体的选择

性吸收来获得气体的浓度，可以避免传统气体采样中由于脱气环节存在较大误差导致诊断分析有误等缺陷。因此，本文采用光谱气体分析系统来获得变压器气体，光谱分析系统由傅里叶变换红外光谱仪

(以下简称光谱仪)与个人计算机两大部分组成，如图 1 所示。光谱仪作为敏感被测气体的多传感阵列与计算机相结合建立的多组分混合气体分析系统。

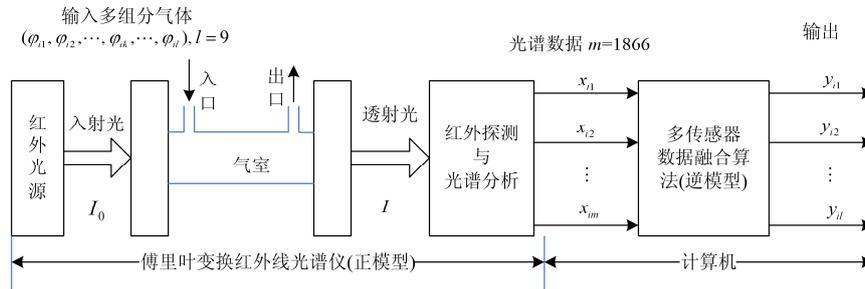


图 1 光谱气体分析系统结构原理框图

Fig. 1 Diagram structure of the spectral gas analysis system

对光谱仪进行 n 次标定实验，获得 n 组标定样本对集 F_i, X_i ，表征光谱仪的输入与输出关系为：输入样本集 $F_i=[j_{i1}, j_{i2}, \dots, j_{ik}, \dots, j_{il}]$, $l=9$ ；输出样本集 $X_i=[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, \dots, x_{im}]$, $m=1866$ 。

其中： F_i 为一个 l 维向量，是第 i 次标定时，输入光谱仪 $l=9$ 种被测气体浓度的标定值； X_i 为一个 m 维向量，是第 i 次标定时，光谱仪输出的光谱数据。

当数量足够且输入 F_i 完备时，输出 X_i 样本对集就构成光谱仪的正模型。

定义 x_{ij} 为一个比值，具体表达式为 $x_{ij}=I(\gamma_j)/I_0(\gamma_j)$ ，式中： $I_0(\gamma_j)$ 为以波数 γ_j 入射进入气室的红外光强； $I(\gamma_j)$ 为气室透射出去波数为 γ_j 的红外光强；光谱仪输出的光谱数据 x_{ij} 表示一定浓度的某类气体对波数 γ_j 红外光吸收或透射的程度，它反映了气体的种类与其浓度值。故光谱仪的正模型反映了光谱仪是一个可以敏感多种气体类型与量值的多传感器阵列，从而可用来建立监测多组分气体的多传感器系统。

2 故障诊断

2.1 故障诊断

现行的《变压器油中溶解气体分析和判断导则》(DL/T722-2000)，将不同故障类型产生的特征气体归纳，总结的不同故障类型产生的油中特征气体组分，只能粗略地判断充油电力变压器内部的故障。因此国内外通常以油中溶解的特征气体的含量来诊断充油的故障性质。

变压器油中溶解的特征气体可以反映故障点周围的油和纸绝缘的分解本质，但气体组分特征随着

故障类型、故障能量及涉及的绝缘材料不同而不同，即故障点产生烃类气体的不饱和度与故障源能量密度之间有密切的关系，现场的故障情况非常复杂，单一的分析方法难以全面量化、反映各种可能存在的故障类型。

2.2 综合方法

为了克服单一分析方法难以全面诊断现场运行情况复杂的变压器可能存在的各种故障，本文充分借鉴变压器现有的诊断技术，综合运用改良三比值法、大卫三角形法和立方体图示法等三种经典的变压器诊断方法。

考虑到电力现场中故障诊断结果较少直接动作于正在运行的变压器，更多以告警等方式提醒运行人员注意。三种分析方法综合运用于变压器故障诊断时，由于各种方法的侧重点不同，可能会出现不同的诊断结果，因此，尽可能保留综合分析方法诊断得到的故障类型，首先定义三种分析方法诊断结果不一致时的综合诊断判据。

综合诊断判据 1：三种诊断方法中，只要其中一种方法判断出故障情况，就提出故障预警并通知进一步检查，以避免故障诊断遗漏；

综合诊断判据 2：三种诊断方法中，至少两个方法检测出故障，同时检查方法中提示的故障类型，并重点检查多个方法同时诊断出的故障类型。

2.2.1 改良三比值法

改良三比值法是变压器故障类型最经典的判断方法。改良三比值法根据充油变压器内油、绝缘纸在故障下裂解产生气体组分含量的相对浓度与温度的相互依赖关系。过热性故障产生的故障特征气体主要是 CH_4 和 C_2H_4 ，而放电性故障主要的特征气体是 C_2H_2 和 H_2 ，为此可以采用 CH_4/H_2 来区分是

放电故障还是过热故障。

国际电工委员会和我国国家标准推荐 CH₄/H₂、C₂H₄/C₂H₆、C₂H₂/C₂H₄ 三个比值来判断故障的性质。选用 CH₄/H₂、C₂H₄/C₂H₆、C₂H₂/C₂H₄ 三个比值, 在相同的情况下把这些比值以不同的编码表示, 根据测试结果把这三对比值换算成对应的编码组, 然后查表对应得出故障类型和故障的大体部位的方法。

2.2.2 大卫三角形法

相对于改良三比值法等变压器故障诊断方法, 大卫三角形法保留了一些由于落在 IEC 比值法提供的比值限值之外而被 IEC 比值法漏判的数据等优点。该方法选用 3 种特征气体(甲烷、乙炔、乙炔)分别计算各种气体在气体总量中的百分比, 然后依据 3 个百分比值在大卫三角形中画出一个点最后通过点在三角形中画出一个点, 最后通过点在三角形中的不同区域, 查询对应区域的编码组, 找出故障类型。

2.2.3 立方体图示法

立方图示法在三比值法给定的范围区间上做了一些改进, 提高了远离区间分界点故障诊断准确率, 并在立体坐标图上建立的立方体图示法可方便地直观的展现不同类型故障的发展趋势^[8]。立方体图示法首先计算出甲烷与氢气的比值、乙炔与乙炔的比值、乙炔与乙炔的比值, 然后根据这三比值在立方体中画出一个点, 最后通过点在立方体中的不同区域, 查询对应区域的编码组, 找出故障类型。

3 软件实现

变压器运行数据和诊断结果以图形化的方式显示, 有助于现场运行人员观察和采取相应的处理措施。因此, 专门开发运行于 Windows 操作系统平台之下的变压器诊断分析软件, 其主要功能包括: 原始数据采集, 监测设备实时运行状态, 实时数据的查询、显示, 历史数据与记录的存储、查询与打印, 原始数据与分析结果的显示等。

软件开发工具采用当前最流行的 Visual Studio 2005, Visual Studio2005 提供了良好的编程环境和接口, 有助于快速开发变压器诊断分析软件, 减少开发难度。

Visual Studio2005 虽然也提供了自身的图像工具, 但所提供的画图工具只要是大众化的, 对于变压器运行状况这种工程专业数据的显示, 则并不十分友好, 因此, 在 Visual Studio2005 中引入第三方画图插件, 以便图形化显示变压器的运行数据、分析结果对比图和谱图等。

同时, 变压器在线监测和诊断过程中需要收集

大量气体成分数据和产生诊断结果, 需要涉及大量数据, 因此, 引入 ORACLE 数据库以方便变压器运行数据存储和管理, ORACLE 具有完整的数据管理功能和分布式处理功能, 适用于变压器诊断软件的后台数据管理。

整个变压器故障诊断软件的结构如图 2 所示, 在 Visual Studio2005 平台上利用制图插件, 方便变压器数据图形化显示, 后台采用 ORACLE 数据库调用数据进行分析 and 显示。显示界面主要包括变压器监测参量的实时和历史运行状态、历史数据报表、谱图文件、数据诊断和数据统计等四个核心界面。

1) 运行状态: 在运行状态标签下可以查看变压器气体的实时数据和历史数据。默认显示实时数据, 如图 3 所示。若要查看历史状态, 单击“显示方式”下拉框, 选择“历史状态”, 选择所需查看日期, 切换为历史状态后, 操作界面也随之切换到对应的历史状态界面中, 历史状态界面与运行状态界面类似, 只不过调用的数据是所选择时间对应的变压器数据。

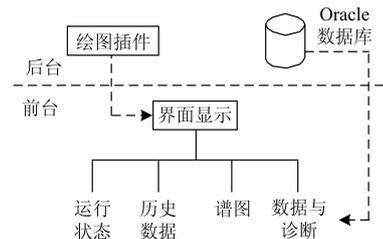


图 2 变压器诊断软件整体结构

Fig. 2 Overall structure of the transformer diagnostic software

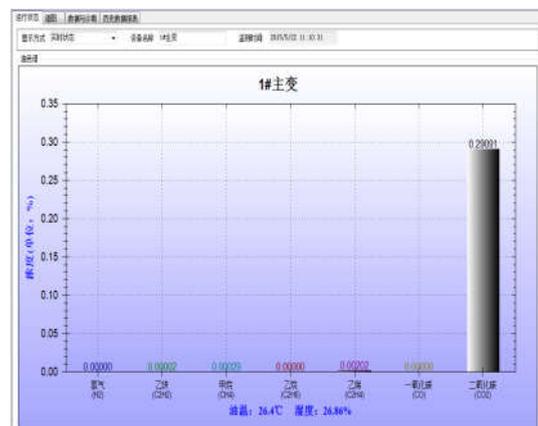


图 3 变压器运行状态界面

Fig. 3 Interface of transformer operation status

2) 历史数据报表: 变压器运行趋势是观察变压器状态的重要途径, 因此, 专门设置数据报表, 实现历史趋势的查询, 如图 4 所示。借用该报表, 可以进行变压器数据的查询、分析以及报表打印。

3) 谱图: 在谱图标签下可以查看当前查看的原始气体含量数据所对应的谱图, 如图 5 所示。通过调用 ORACLE 数据库里的变压器原始气体数据, 经分析后以图形化方式直观显示对应的谱图。

4) 数据与诊断: 在数据与诊断标签下可查看当

前查询的原始数据的诊断结果, 综合改良三比值法、大卫三角形法和立体图示法这三种方法对变压器进行故障诊断, 并直观显示诊断结果。选取变压器故障诊断示范项目中运行的某台具体变压器为例, 观察对应时刻的故障诊断数据, 如图 6 所示。

序号	监测时间	氢气	一氧化碳	二氧化碳	甲烷	乙烷	乙烯	乙炔	总烃
1	2018-03-02 10:55:55	0.40	0.70	9489.20	5.30	0.20	0.20	45.40	51.20
2	2018-03-02 10:10:31	10.00	0.20	2969.10	2.90	20.20	0.20	0.00	23.30
3	2018-03-02 09:52:12	14.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.80
4	2018-03-02 09:52:12	14.50	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.20
5	2018-03-02 10:18:32	14.00	0.70	9489.20	5.30	0.00	0.50	45.40	51.20
6	2018-03-02 10:52:12	14.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.80
7	2018-03-02 10:55:58	10.00	1.30	1980.80	0.00	18.50	0.00	0.00	18.50
8	2018-03-02 11:04:32	10.00	0.00	2971.30	2.00	19.90	0.00	0.00	21.90
9	2018-03-02 10:48:09	10.00	2.20	5044.10	4.50	3.90	0.10	0.00	8.50
10	2018-03-02 10:58:55	10.00	2.50	5970.10	4.20	4.80	0.30	11.90	21.20
11	2018-03-02 21:58:55	0.40	2.80	6870.70	4.90	0.00	0.50	0.00	5.40
12	2018-03-02 21:58:55	0.40	0.60	7090.30	3.70	9.90	0.30	2.80	15.70

图 4 变压器历史数据查询界面

Fig. 4 Interface of transformer historical data query

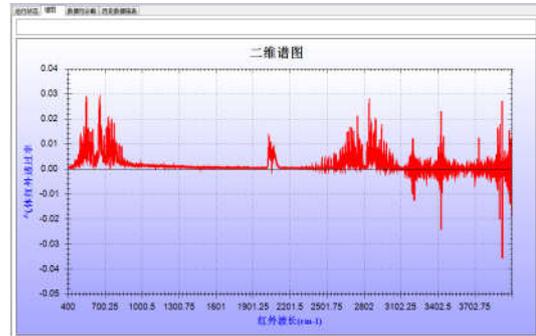
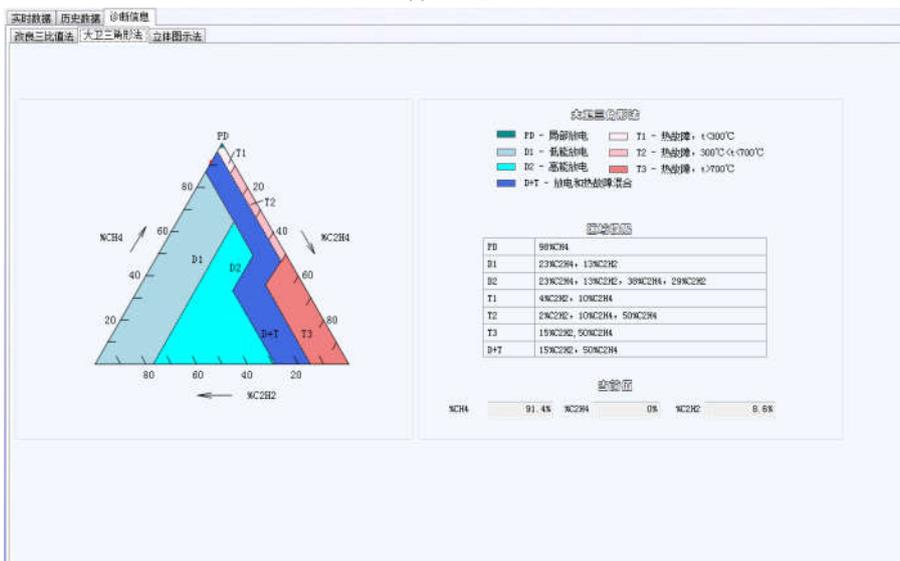


图 5 变压器谱图

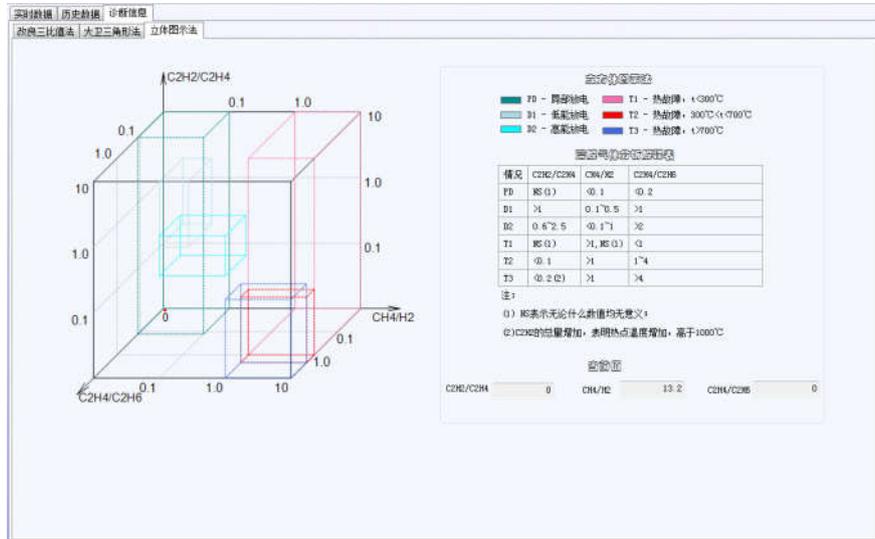
Fig. 5 Transformer spectrum



(a) 三比值法



(b) 大卫三角形法



(c) 立体图示法诊断

图 6 综合方法诊断结果图

Fig. 6 Diagnosis result of integrated method

由于当前变压器处于正常状态, 图 6(a)界面左侧反映了当前时刻的变压器诊断结果, CH₄/H₂、C₂H₄/C₂H₆、C₂H₂/C₂H₄ 等三个具体比值, 根据比值判断变压器处于正常状态, 该界面右侧同时提供故障类型诊断依据, 方便现场运行直接对照左侧现场数据判断故障类型。

图 6(b)界面右下角显示大卫三角法中所用到的比值的当前值, 以比例的数据形式直接显示。界面左侧图形化直观地显示大卫三角法依据, 同时提供该图形的区域数值。

图 6(c)立体图示法的界面跟大卫三角法的界面类似, 既显示当前时刻变压器诊断数据的编码比值, 也以图形的形式具体说明该当前值所对应的变压器状态是否正常, 进而提供具体的故障诊断类型。

4 结语

针对当前变压器采用油中溶解气体诊断还存在准确性问题, 本文从变压器现场运行实用的角度出发, 研发一套完整的变压器在线诊断分析系统, 主要包括下面特点:

1) 采用性能先进的光谱分析系统, 准确、便捷地提取采集气体。

2) 综合应用改良三比值法、大卫三角法和立方体图示法这三种经典的变压器故障诊断方法, 避免当前单一分析方法难以全面诊断变压器各种可能存在的故障类型。

3) 以可视化的方式直观显示变压器数据和诊断结果。

参考文献

- [1] 石鑫, 朱永利, 王刘旺, 等. 基于深度信念网络的电力变压器故障分类建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 71-76.
SHI Xin, ZHU Yongli, WANG Liuwang, et al. Power transformer fault classifying model based on deep belief network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 71-76.
- [2] 公茂法, 张言攀, 柳岩妮, 等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 113-117.
GONG Maofa, ZHANG Yanpan, LIU Yanni, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 113-117.
- [3] 谢敏, 吴亚雄, 黄庶, 等. 基于有色自控 Petri 网的电网故障区域识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 56-64.
XIE Min, WU Yaxiong, HUANG Shu, et al. Identification of fault area in power system based on colored self-modifying Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 56-64.
- [4] 许惠君, 王宗耀, 苏浩益. 基于 DGA 的反馈云熵模型电力变压器故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 115-119.
XU Huijun, WANG Zongyao, SU Haoyi. Dissolved gas analysis based feedback cloud entropy model for power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection

and Control, 2013, 41(23): 115-119.

[5] GB/T7252-2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则 [S].

[6] DL/T722-2000 变压器油中溶解气体分析和判断导则 [S].

[7] 杨振勇. 《变压器油中溶解气体分析和判断导则》判断变压器故障的探讨[J]. 变压器, 2008, 45(10): 24-26.
YANG Zhenyong. Discussion on diagnosis of transformer fault based on "guide to the analysis and the diagnosis of gasses dis-solved in transformer oil[J]. Transformer, 2008, 45(10): 24-26.

[8] 张卫华, 苑津莎, 王杉. 基于改良三比值法的变压器故障基本信度分配计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 115-121.
ZHANG Weihua, YUAN Jinsha, WANG Shan. A calculation method for transformer fault basic probability assignment based on improved three-ratio method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 115-121.

[9] 秦英. 变压器的大卫三角形故障诊断融合方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.

[10] 董卓, 朱永利, 张宇, 等. 基于主成分分析和基因表达式程序设计的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 94-99.
DONG Zhuo, ZHU Yongli, ZHANG Yu, et al. Transformer fault diagnosis based on principal component analysis and gene expression programming[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 94-99.

[11] 郑坤. 基于DGA的变压器故障诊断可视化组件的设计与实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.

[12] 王军庄, 常鲜戎, 顾卫国. 基于OCL技术的Oracle数据库数据快速存取研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 53-56.
WANG Junzhuang, CHANG Xianrong, GU Weigu. Research on quick access in Oracle database based on OCL technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 53-56.

收稿日期: 2016-06-13; 修回日期: 2016-07-22

作者简介:

吕守国(1969-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向为电力系统输电管理; E-mail: tjdgyhc25@163.com

崔玉新(1966-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统自动化;

冯迎春(1978-), 男, 硕士, 副高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化。

(编辑 张爱琴)