

关键绩效指标在变电站设备在线监测中的应用

尹凯, 笃峻, 葛立青

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 变电站内设备在线监测传感技术已经相对成熟, 但其上送的数据相对专业, 且设备状态改变是一个渐变过程, 从数值上看这种变化是缓慢的, 不易察觉的。如何及时发现这种变化, 并通过直观的方法展示出来, 成为成功应用在线监测技术的关键。提出了一种方法, 通过评价计算程序对多种数据来源, 包括实时数据、准实时数据及离线数据, 进行分析处理, 将变电站内设备状态以关键绩效指标(KPI)形式展现出来。该技术已经应用于多个智能变电站, 取得良好效果。

关键词: 在线监测; 关键绩效指标; 智能变电站

Application of KPI in online monitoring system for electrical equipment in substation

YIN Kai, DU Jun, GE Liqing

(NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The technology of online monitoring for electrical equipment is mature, but the data the system provided is too professional to read. Also the course of electrical equipment status change often lasts very long time. The changing in numeric is too small to notice the problem of equipment. By acquiring and processing different kinds of data, such as real-time data, historic data, off-line data from management information system and manual intervention data, this paper applies key performance indicator (KPI) in online monitoring system to provide more readable results of electrical equipment status. The new system has been applied in many smart substation and got positive response.

Key words: online monitoring; key performance indicator; smart substation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0063-06

0 引言

为满足未来持续增长的电力需求, 实现更大范围的资源优化配置, 众多国家和组织不约而同地将发展智能电网作为主要技术方向。其中变电站智能化是智能电网的重要组成部分。目前变电站中已有的自动化系统偏重于变电站运行, 国内外已经开展了很多和运行相关的智能高级应用的研究工作^[1-3]。但是对于变电站设备维护和管理智能化研究还处于初始阶段^[4-7]。由于成本和技术限制, 变电站内纯粹的智能一次设备还很少。对于一次设备的监测, 多通过安装传感器来完成。通过在一次设备上安装传感器, 已经实现对变压器、断路器、互感器、电容器、套管、避雷器等高压电气设备的状态在线监测。但传感器上送的

数据相对专业, 使用者需要一定专业知识才能够解读。同时, 设备状态的改变往往是一个渐变过程。从实时数据上看这个变化是缓慢的, 不易察觉的^[8]。如何利用变电站内各种数据来源, 及时发现设备的状态变化, 以简洁清晰的方式展现出来, 成为变电站设备维护和管理智能化研究的关键。

本文首先对变电站内各种数据进行了分类, 总结了影响设备状态变化的各种因素。然后提出了一种基于全景数据的分析方法, 从而将设备状态以 KPI 形式更加直观地展现出来。

1 智能变电站设备在线监测数据流分析

1.1 网络结构

智能变电站的网络结构横向可以分为站控层网络、间隔层网络及过程层网络三个层次, 纵向

可以划分为安全 I、II、III、IV 分区^[9]。如图 1 所示。

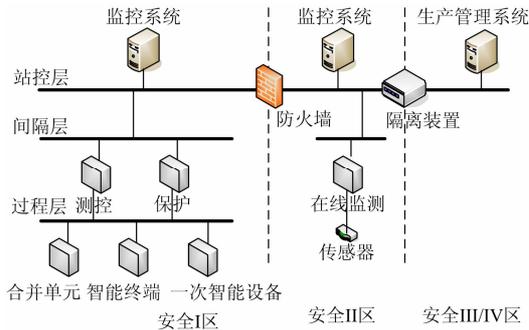


图 1 智能变电站网络结构图

Fig. 1 Network structure of smart substation

在安全 I 区，站控层监控系统遵循 DL/T 860 标准与间隔层测控、保护装置进行实时数据交换。间隔层测控、保护装置通过 GOOSE 网、SV 网过程层网络获得设备实时运行信息。在安全 II 区，

站控层监控系统遵循 DL/T 860 标准与在线监测装置进行实时、准实时数据交互获得设备监测信息，在线监测装置的传感器一般就地安装于一次设备，通过内部规约上传设备监测信息至在线监测装置。在安全 III/IV 区的其他系统如生产管理系统，可以通过 JSON、SOAP 或文件交换等方式跨越隔离装置实现与监控系统的离线数据交换。

1.2 设备状态监测相关数据流分析

从上文可知，变电站内与设备状态监测的数据来源较为复杂，跨越不同的网络层次和安全分区。这些数据可以分为以下几类：运行状态、变化趋势及家族缺陷。运行状态主要反映当前设备的电气或机械特征。变化趋势用于表明微小量的渐变，反映故障的前期征兆。家族缺陷由设计、材质、工艺等共性因素导致，具有共性因素的其他设备认为具有相同的家族缺陷。表 1 总结了设备状态监测的数据流。

表 1 设备状态监测相关数据流

Table 1 Data stream of condition monitoring

数据内容	数据来源	数据类型	时效性	安全分区	
局放、气体密度、气压、色谱、机构特性、泄漏电流等	在线监测装置	数值量、状态量、文件	实时、准实时	安全 II 区	
运行状态	电压、电流、有功、无功、温度	保护、测控	数值量、状态量	实时	安全 I 区
	实验数据、巡检数据	生产管理系统	数值量、状态量	离线	安全 III/IV 区
变化趋势	动作次数、介损变化率、初始差别率	监控系统历史统计	数值量	离线	安全 I/II 区
家族缺陷	设计、材质、工艺等设备缺陷	生产管理系统	状态量	离线	安全 III/IV 区

从表 1 中可以看出，影响设备状态的因素众多，包括电气、化学、机械多种数据；数据来源复杂，来自不同网络层次的不同设备、系统；不同来源的数据时效性也不相同，既包含了智能电子设备(IED)的实时、准实时数据，还包含了历史统计及其他系统的离线数据；数据跨越多个安全分区。

1.3 信息集成

由以上设备状态相关数据流分析可知，设备状态的监测前提是统一的全景数据平台，即实现统一建模，统一采集。全景数据平台的数据采集与处理模式如图 2 所示。

由图 2 可知，全景数据平台改变了变电站各个子系统数据采用不同编码规则、不同数据库平台所形成的若干信息孤岛。将原独立设置的各类子系统功能，经过整理全部融合，在统一平台上进行必要的数据结构重构，提高了数据利用率和互动性。

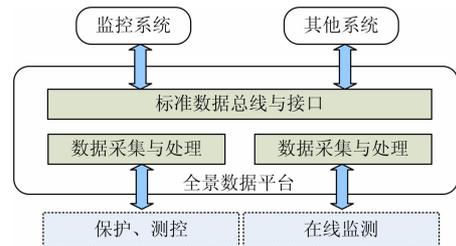


图 2 全景数据平台

Fig. 2 Panoramic data platform

2 设备状态评价与预警

2.1 设备状态函数

尽管影响设备状态的因素众多，但当这些因素都有确定的数值时，就可以认为设备处在一定状态^[10-11]。如果设备的某一个性质发生了改变，那么设备的状态也发生了改变。换句话说，设备处在

定的状态, 这些因素有确定之值。

设 $X_n(n=1,2,3,\dots)$ 为设备的状态变量, 则设备的状态可以用函数表示为

$$S = F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

以变压器为例, 当变压器的电流、电压、温度、气体含量等确定时, 认为变压器处于某个确定状态, 电流、电压、温度、气体含量等则是变压器这个体系的状态变量。

2.2 设备状态变量的分类及相互关系

设备状态的变量在一定条件下具有加和性, 即其数值与体系中物质的量成正比, 是设备中各部分该变量的总和, 这种性质称为广度性质。

设备状态变量的数值不随设备的物质的量变化而变, 它仅由设备本身的特征所决定, 也就是没有加和性, 这种性质称为强度性质。例如设备的某些家族缺陷。

各变量之间并不是完全独立, 而是存在一定关联关系。以变压器为例, 当电流增大时, 其他变量如温度、功率也会上升。因此某些无法直接获得的变量可以通过现有变量推算得出。

2.3 设备状态的评价

理论上, 变量确定后设备状态可以通过式(1)计算出来。但设备是一个复杂的体系, 其运行状态很难通过类似式(1)的公式计算出来。其次对于变电站监控系统, 全景数据平台解决了状态变量的获取方法问题, 但并不能保证计算设备状态的所需变量一定可以获得。另外, 对于相同变量, 不同地区、不同运行方式、不同设备型号, 设备状态都可能有不同的计算方法。例如变压器过负荷, 不同运行方式下越限的定义也会不同。描述设备的变量不同, 设备状态函数也会不一样。以上这些因素, 都会导致对设备状态的计算结果千差万别, 难以形成统一的标准。

尽管设备状态计算的差异较大, 但对于设备状态的评价却是相对统一的。例如, 对特定设备都可以按照一定的原则评价为正常、异常、故障等。设备状态评价可以用函数表示为

$$R = E(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

因此, 相比通过状态函数计算设备状态, 直接根据式(2)为使用者提供设备状态的评价结果更具有实际意义。以变压器为例, 可以根据其某些可计算的运行特征, 如负荷、温度、非电量保护动作情

况、气体含量、介质损耗, 来评价变压器设备状态。如何抽取这些关键特征并确定其所占的比重成为能否准确评价设备状态的重点。

2.4 设备状态的预警

对于变电站监控系统, 不仅希望可以知道当前设备运行情况, 更希望可以对将要发生的设备异常进行预警, 预防事故的发生。设设备变化前的状态为始态 S_1 , 变化后的状态为终态 S_2 , 则设备终态与始态的关系可表示为

$$S_2 = S_1 + \Delta S \quad (3)$$

需要注意的是设备从一个状态转变为另一个状态, 即 ΔS 可以经过不同的途径引起。例如避雷器失效可能是动作次数超过限值, 也可能是阻性电流慢慢增长直至超过允许值。因此设备状态的变化途径, 可以用一系列类似式(3)的公式来表示。对 ΔS 的求导目前常用的方法有: 回归分析法, 时间序列法, 神经网络法, 灰色预测法, 组合预测法等。对于设备状态的预警, 应更加侧重于设备变量变化的具体方式, 根据状态变量特点选取合适算法。

3 设备 KPI

3.1 设备 KPI 建立原则

由以上分析可知, 可以根据式(2)、式(3)对设备的状态进行评价与预警。本文以设备状态变量作为输入, 以量化的 KPI 作为输出, 从而综合反映设备状态的评价与预警情况。设备 KPI 的建立应遵循“关键性、可度量、可实现、现实性、有时限”原则, 具体表现为:

(1) 指标应是能反映设备运行状态的关键特性, 而不需要全部特性。即无需计算出所有指标, 而是抽取特定指标作为衡量设备运行状况的标准。

(2) 指标应是量化的, 量化的指标可以增加可读性。

(3) 指标的输入的状态变量应是可获得的。输入变量可能限于当前技术条件无法获得, 这类指标不应参与评价。

(4) 指标应既注重结果又注重过程。即应能对设备状态进行评价与预警。

(5) 指标的计算应是特定期限内的值。

3.2 设备 KPI 选取

设备 KPI 的选取应该根据设备运行特点, 应从影响设备正常运行可能造成设备故障着手进行选

取，主要体现在以下几个方面：

(1) 设计、材质、工艺等设备缺陷。

(2) 恶劣的环境和苛刻的运行条件等可能影响设备运行的因素。

(3) 材料的劣化，包括机械性能、绝缘(固体绝缘、气体绝缘、液体绝缘、真空绝缘)的下降。

根据上文总结的设备 KPI 建立原则，本文对变电站内的主要设备的 KPI 进行了整理。列表如表 2~表 5。

表 2 变压器/电抗器 KPI

Table 2 Transformer/Reactor KPI

名称	说明	用途
家族缺陷	设计、材质、工艺等设备缺陷	状态评价
历史缺陷	评价周期内多次重大缺陷	状态评价
过负荷	达到短期急救负荷运行规定或长期急救负荷运行规定	状态评价
温度	包括油温及红外测温	状态评价
保护动作	非电量保护动作	状态评价
油色谱分析	气体含量及增长趋势	状态评价、预警
设备绝缘	铁芯电流及其增长趋势、局部放电监测数据、高压实验数据	状态评价、预警
介质损耗	介质损耗及变化率	状态评价、预警

表 3 断路器 KPI

Table 3 Circuit breaker KPI

名称	说明	用途
家族缺陷	设计、材质、工艺等设备缺陷	状态评价
历史缺陷	评价周期内多次重大缺陷	状态评价
温度	红外测温	状态评价
保护动作	控制回路告警	状态评价
机械特性	分合闸次数及时间统计	状态评价、预警
设备绝缘	泄露电流及其增长趋势、局部放电监测数据、高压实验数据	状态评价、预警

表 4 电容性设备 KPI

Table 4 Capacitive equipment KPI

名称	说明	用途
家族缺陷	设计、材质、工艺等设备缺陷	状态评价
历史缺陷	评价周期内多次重大缺陷	状态评价
过负荷	达到短期急救负荷运行规定或长期急救负荷运行规定	状态评价
电容量	电容量与初始值的差值及其变化率	状态评价、预警
介质损耗	介质损耗及变化率	状态评价、预警

表 5 避雷器 KPI

Table 5 Lightning arrester KPI

名称	说明	用途
家族缺陷	设计、材质、工艺等设备缺陷	状态评价
历史缺陷	评价周期内多次重大缺陷	状态评价
阻性电流	阻性电流与初始值的差值及其变化率	状态评价、预警
动作次数	避雷器动作次数	状态评价、预警

4 程序设计与实现

4.1 总体流程

KPI 计算程序首先从全景数据平台获取设备状态变量，然后把变量作为输入计算设备的 KPI，最好将 KPI 计算的结果输出至图形和告警。程序流程图如图 3 所示。

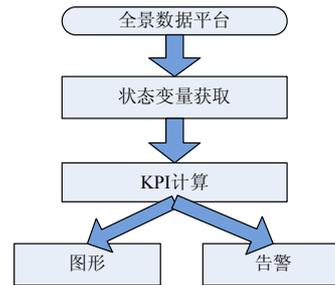


图 3 程序流程图

Fig. 3 Flow chart of KPI program

从图 3 可以看出，程序主要包含状态变量获取、KPI 计算和结果展示三个模块。下面分别对三个模块的实现进行介绍。

4.2 状态变量获取

由上文分析可知，设备的状态变量可以分为两类广度变量和强度变量。其中广度变量，应在程序计算周期内定时从全景数据平台刷新；强度变量代表设备本质，无需更新。另外各变量之间并不是完全独立，而是存在一定关联关系。对于某些无法从全景数据平台获得变量，程序应该具有推算的能力，例如可以通过电压与电流计算出功率大小。图 4 给出了状态变量获取的流程图。

程序需要首先判断状态变量的性质，对于广度变量需要定时从全景数据平台刷新。如果变量无法直接获得，程序需要根据当前已有变量进行推算。如变量无法得出，需要对此变量进行标记，跳过后续与此变量相关的 KPI 计算。

4.3 KPI 计算

上文总结了变电站主要设备的 KPI，但对于每条 KPI 在设备评价和预警中所占的比重并没有规

定。每条 KPI 的比重与变电站的电压等级、重要程

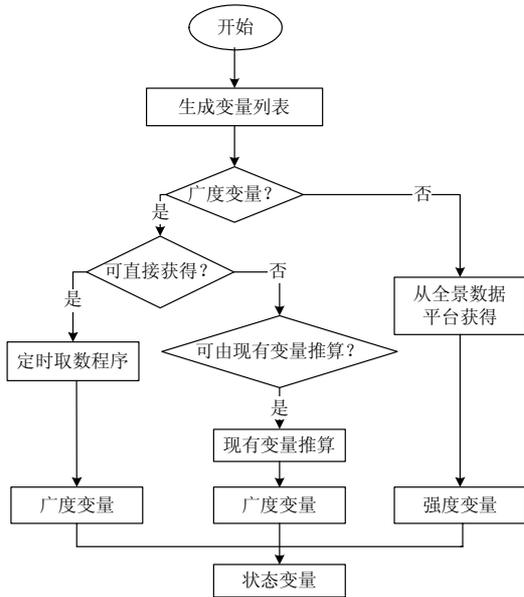


图 4 状态变量获取流程图
Fig. 4 Flow chart of condition variable acquisition

度, 不同地区的运行习惯等等因素有关, 应允许使用者进行设定。KPI 计算的某些参数(限值等)可能会随运行方式、时段发生改变, 同样要求可以进行灵活设定。对于变电站投运初期, 可以采用较为简洁的方法如回归分析法, 进行设备状态预测。待数据收集全面后, 可以更换为人工神经网络等复杂算法。随着技术的进步新传感器的安装, 某些原来难以计算 KPI 成为可能, 计算程序需要提供简单方法添加新的 KPI。程序计算的结果应该是准确的, 避免漏报或者误报。总之 KPI 计算应兼具灵活性和可靠性的特点。图 5 给出了 KPI 计算的流程图。

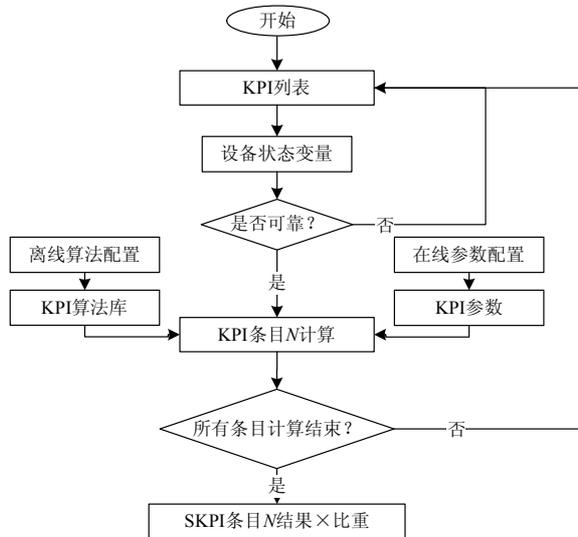


图 5 KPI 计算流程图
Fig. 5 Flow chart of KPI calculation

程序首先判断设备状态变量是否可靠, 如果变量数据来源不可靠, 则跳过此条 KPI 计算。KPI 算法和参数应允许使用者进行修改。KPI 计算结合 KPI 算法和参数, 得出此条 KPI 结果。所有条目计算完毕后, 汇总得出此设备的总体结果。

下面以变压器为例, 具体演示 KPI 计算的过程。表 6 给出了某一时刻能够收集到的状态变量列表。

根据收集的状态变量数值, 可以计算出此变压器 KPI 值, 监控系统根据 KPI 大小对此变压器状态进行评价。表 7 给出了按照设定好的 KPI 公式后的

表 6 变压器状态变量列表

Table 6 Condition variable list of transformer		
名称	值	来源
家族缺陷	0	生产管理系统
统计周期内重大缺陷次数	1	监控系统统计
电流	101 A	测控
油温	90°C	测控
非电量保护动作	0	保护
总烃含量	100 μL/L	在线监测
C ₂ H ₂ 含量	6 μL/L	在线监测
C ₂ H ₂ 增长率	12%	监控系统统计
CO、CO ₂ 增长率	20%	监控系统统计
H ₂ 含量	100 μL/L	在线监测
铁芯接地电流	0.4 A	在线监测
绝缘电阻	15 000 MΩ	生产管理系统(高压试验)
本体介损变化率	10%	在线监测、监控系统统计
套管介损变化率	15%	在线监测、监控系统统计

表 7 变压器 KPI 计算

Table 7 KPI calculation of transformer			
名称	公式	比重	值
家族缺陷	$KPI=100-N \times 50$	10%	10
历史缺陷	$KPI=100-N \times 50$	10%	5
过负荷	$IF (TIME < 2 H) KPI=100 \times (1-T/150)$ $ELSE KPI=100 \times (1-T/100)$	10%	3
油温	$KPI=100 \times (1-T/95)$	10%	5
非电量保护动作	$KPI=100-N \times 100$	10%	10
油色谱	$KPI=100 \times (1-H/150)$	5%	1
	$KPI=100 \times (1-C_2H_2/5)$	5%	-1
	$KPI=100 \times (1-dC_2H_2/0.1)$	5%	-1
	$KPI=100 \times (1-dCO/0.1)$	5%	-1
设备绝缘	$KPI=100 \times (1-I/0.3)$	5%	-1.7
	$KPI=100 \times (R/10000-1)$	5%	2.5
介损变化	$KPI=100 \times (1-tg \delta/0.3)$	20%	10
合计	(0~30 故障, 31~60 异常, 61~100 正常)	100%	41.8

计算结果。最终计算出该变压器 KPI 值为 41.8，状态异常。

4.4 KPI 结果展示

通过仪表盘、光子牌、数值量等图形控件展示 KPI 的总体结果，同时可以显示 KPI 条目的详细信息。对于设备状态变化，可以通过告警窗口进行提醒。

5 结论

本文首先对智能变电站内和设备监测相关的数据流进行了分析，提出将设备作为一个体系利用 KPI 对其状态进行评估和预警。KPI 的建立应遵循“关键性、可度量、可实现、现实性、有时限”的原则，着重从设备缺陷、运行环境和材料劣化这几个方面抽取关键指标。通过在多个智能变电站的实施表明，KPI 可以综合反映设备状态，具有良好的易读性，能够及时反映设备状态的微小变化，并给出预警，从而减轻变电站设备运行和维护的压力。

参考文献

[1] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 61-65.
LI Mengchao, WANG Yunping, LI Xianwei, et al. Smart substation and technical characteristics analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 61-65.

[2] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 57-60.
CAO Nan, LI Gang, WANG Dongqing. Key technologies and construction methods of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 57-60.

[3] 庞红梅, 李淮海, 张志鑫, 等. 110 kV 智能变电站技术研究状况[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 47-52.
PANG Hongmei, LI Huaihai, ZHANG Zhixin, et al. Research situation of 110 kV smart substation technology [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 47-52.

[4] 张振华. 高压电力线路在线视频监控系统工程应用及实践[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 37-42.
ZHANG Zhenhua. Research and application of online video surveillance system for high-voltage power lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 37-42.

[5] 传感器并联型局部放电监测与定位方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 47-52.

GAO Penglu, HU Yue, LIU Bin, et al. Partial Discharge monitoring and locating in substation using multiple sensors in parallel[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 47-52.

[6] 朱林, 段献忠, 苏盛, 等. 基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 43-46.
ZHU Lin, DUAN Xianzhong, SU Sheng, et al. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 43-46.

[7] 温和, 滕召胜, 曾博, 等. 基于三角自卷积窗的介损角测量算法及应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 33-36.
WEN He, TENG Zhaosheng, ZENG Bo, et al. Dielectric loss angle measurement algorithm and application based on triangular self-convolution window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 33-36.

[8] 陈维荣, 宋永华, 孙锦鑫. 电力系统设备状态监测的概念及现状[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 12-17.
CHEN Weirong, SONG Yonghua, SUN Jinxin. Concept and present situation of condition monitoring of power system equipment[J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 12-17.

[9] 国家电网公司. Q/GDW 383-2009 智能变电站技术导则[S]. 北京: 国家电网公司, 2009.
State Grid Corporation of China. Q/GDW 383-2009 technical guide for smart substation[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2009.

[10] RIFFIN P. Continuous condition assessment and rating of transformer[C] // 1999 Proceedings of the Sixty-Sixth Annual International Conference of Doble Clients, 1999.

[11] FESER K, MAIER H A, FREUND H, et al. On-line diagnostic system for monitoring the thermal behaviour of transformers[C] // CIGRE Diagnostics and Maintenance Techniques Symposium, Berlin, 1993.

收稿日期: 2014-05-16

作者简介:

尹凯(1981-), 男, 硕士, 工程师, 从事厂站自动化的研究和开发工作; E-mail: yink@nrec.com

葛峻(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事厂站自动化系统研究及相关产品开发;

葛立青(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

(编辑 周金梅)