



基于物联网的电网智能节能量测量方法及实现

张大品¹, 欧清海², 何业慎³, 张翼英⁴

(1. 国网甘肃综合能源服务有限公司, 甘肃 兰州 730070;

2. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100070;

3. 深圳市国电科技通信有限公司, 广东 深圳 518000; 4. 天津科技大学, 天津 300457)

摘要: 电网节能工程, 尤其是输变电相关工程是电网节能的重要环节, 总结了输变电主要环节的节能量测量方法, 包括 IPMVP 法和我国通用的节能量测量方法。优化了采用变压器和无功补偿等节能措施后节能量的量化及测量方法。同时, 利用物联网技术, 融合相关算法, 提升了量测设备的效率, 以实现对节能量的及时、精准测量。通过对实例分析, 说明节能量的计算和测量方法, 为电网企业的节能量计量提供了理论依据。

关键词: 节能措施; 节能量; 测量与量化; 电力物联网

中图分类号: TM714.3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019058

Intelligent energy saving measurement method and realization of power grid based on IoT

ZHANG Dapin¹, OU Qinghai², HE Yesen³, ZHANG Yiyi⁴

1. State Grid Gansu Integrated Energy Service Co., Ltd., Lanzhou 730070, China

2. Beijing Guodiantong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China

3. State Grid Information & Telecommunication Group China Gridcom Co., Ltd., Shenzhen 538000, China

4. Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China

Abstract: Power grid energy saving engineering, especially transmission and transformation related projects, is an important link of energy saving. The energy saving measurement methods of the main links of transmission and transformation were summarized, including IPMVP method and general energy saving measurement method in China. At the same time, by using the technology of IoT and fusion of relevant algorithms, the efficiency of measuring equipment can be improved, and the energy saving can be measured in a timely and accurate way. The calculation and measurement methods of energy saving were illustrated by an example, which provided a theoretical basis for energy saving measurement in power grid enterprises.

Key words: energy saving measure, amount of energy saving, measurement and quantization, power IoT

1 引言

我国是能源大国,电能需求量大,能源利用率低,电网作为能量输送的载体,电网中的各种电气设备消耗的电能占发电量的 28%~33%,可见电网企业节能降损具有巨大的潜力空间。节能降损可以提高电网企业的经济效益、降低运营成本,并且在减轻对环境的污染方面具有重大意义。近年来电网企业进行了一系列应用新技术、更换新设备的节能改造工程,节能降损效果显著,取得了明显的经济效益和社会效益。

电力物联网中的智能测量装置具有全面感知、可靠传输和智能处理等特点,可以精确地实现相关电能量的采集、测量、传输和处理。本文总结了电网工程节能量的测量和计算方法,充分利用电力物联网的感知技术,利用智能传感器、智能电表、智能电力监测装置等设备,融合新算法对数据进行处理,对节能项目进行了实例分析和验证,解决了国内节能量计算、测量方法不一致与节能效果评估难的问题。

2 电网中的节能措施

2.1 线路和变压器节能的主要技术措施

电网中电能传输的主要设备是输电线路和变压器,也是产生电能损耗的主要两部分。针对线路和变压器节能的主要技术措施如下。

(1) 优化线路

采用直流电阻低的大截面、多分裂导线或增容导线,包括耐热铝合金线、退火铝线、成型铝线以及碳纤维复合芯导线等^[1],可以大幅度提高线路的输送容量、降低线路损耗。

(2) 优化变压器

采用连续卷制硅钢片大幅降低磁阻的 S11、S13 系列低耗能变压器,降低了空载电流,提高了功率因数;非晶合金变压器铁损低,可比硅钢片结构的配电变压器节能 60%~70%^[2]。

对于峰谷负荷变化大的农村负荷则采用高过载配电变压器、调容调压配电变压器,解决了采用大容量变压器长期空载运行空载损耗高的问题。

此外,针对电网中的潮流分布,可以采用下列措施降损。

(1) 优化无功

采用无功补偿装置提高功率因数,可以降低线路损耗。无功补偿设备可分为静态电容器和静止无功补偿器。电容器作为无功补偿装置不能连续调节无功,静止无功补偿器由晶闸管控制,是一种技术先进、使用方便、经济性能良好的动态无功功率补偿装置,可以快速、平滑、连续地调整为无功功率。

(2) 升压降损

对电网进行升压改造,可以有效降低线损。例如:将 10 kV 配电网升级为 20 kV,输送功率一定时,提高电压等级可以降低输电电流,因而可以降低与电流的平方成正比的线损。

2.2 节能量测量的标准

节能量包括节电力和节电量,节电力是采取节能措施后减少的有功功率损耗(单位为 kW),节电量是采取节能措施后减少的有功电量损耗(单位为 kW·h)。国际上认可度高的节能量检测与验证标准主要是《国际性能节能效果的测量与验证协议(International Performance Measurement and Verification Protocol, IPMVP)》和《联邦能源项目测量和验证(Measurement & Verification for Federal Energy Project, M&V)》。而国内能量测量和验证标准则是《节能量测量和验证技术通则》(GBT28750-2012)(以下简称通则)。本文采用通则中的节能量计算式为:

$$E_s = E_r - E_a \quad (1)$$

其中, E_s 为节能量, E_r 为统计报告期的能耗, E_a 为校准能耗,统计报告期指的是节能措施实施后的时间段,校准能耗是采用节能措施后,



根据基准能耗和统计报告期的条件推算出来的项目边界内用能单位、设备、系统的能源消耗量。从式(1)可以看出,节能量不能直接测量出来,只能通过比较节能项目实施前后能量的变化并根据变化条件调整得到。节能量各参数相互之间的关系如图1所示,可见 E_r 和 E_a 是确定节能量的关键^[3]。通则中提出3种节能量测量和验证方法:“基期—影响因素”模型法^[4]、直接比较法^[5]和能耗模拟法^[6]。基期—影响因素模型法需要通过回归分析等方法建立基期能耗与其影响因素的相关性模型。直接比较法需要测量边界内、统计报告期的实际能源消耗量,再根据测量和验证方案中约定的测量和计算方法分别确定 E_r 和 E_a 。能耗模拟法则是采用模拟软件预测校准能耗 E_a 及报告期能耗 E_r 。为了使模拟能耗与实际数据相吻合,应该预先校核模拟软件^[7-8]。

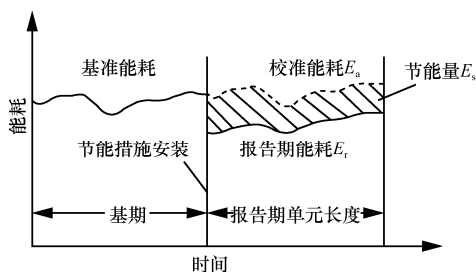


图1 节能量各参数相互之间的关系

3 电网工程中节能量的量化与测量

3.1 线路增容的量化

电网中输电线路功率损耗模型如图2所示^[9]。两个电容支路为导纳支路,电阻电感串联支路为线路阻抗回路。

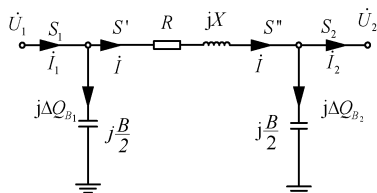


图2 输电线路损耗计算等值电路

线路阻抗回路的功率损耗为:

$$\Delta S_L = \Delta P + \Delta Q = \frac{S^2}{U^2} R + \frac{S^2}{U^2} X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R + \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X = \left(\frac{P}{U \cos \varphi} \right)^2 R + \left(\frac{P}{U \cos \varphi} \right)^2 X \quad (2)$$

导纳支路的损耗是电晕效应在绝缘子上产生的泄漏电流,正常运行时可以将其忽略。考虑边界条件为增容线路首端到末端,不包括送电端和受电端的隔离开关。所以三相电网节电力 $\Delta(\Delta P)$ (单位为kW)可表示为:

$$\Delta(\Delta P) = \left(\frac{P_{\max}}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi} \right)^2 R - \left(\frac{P'_{\max}}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi'} \right)^2 R' \quad (3)$$

其中, $P_{\max}$ 、 $P'_{\max}$ 是改造前、后线路出线最大功率($P'_{\max}$ 为估计值),单位为kW; R 、 R' 是改造前、后线路电阻,单位为 Ω ; $\cos \varphi$ 、 $\cos \varphi'$ 是改造前、后线路最大有功功率时刻的功率因数; U_N 是线路额定电压,单位为kV。

节电量可表示为:

$$\Delta(\Delta E) = \left[\left(\frac{P_{av} k_f}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi} \right)^2 R - \left(\frac{P'_{av} k_f}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi'} \right)^2 R' \right] T \quad (4)$$

其中, P_{av} 、 P'_{av} 表示改造前、后负荷出线平均功率(P'_{av} 为估计值),单位为kW; k_f 表示改造后功率均方根值与平均值折合系数; T 表示负荷出线运行时间,单位为h。

3.2 改造变压器的量化

电网中的双绕组电力变压器功率损耗 Γ 型模型如图3所示。导纳支路代表的是变压器的励磁支路,产生的是磁滞损耗和涡流损耗,也称为铁损。电阻电感支路为绕组电阻和电抗支路产生的铜损。

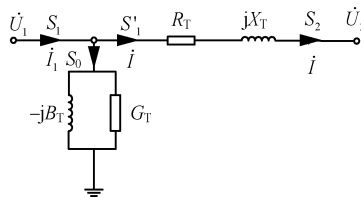


图3 变压器损耗计算等值电路

变压器的有功损耗为铁损 P_0 和铜损 P_K 之和,

可表示为:

$$\Delta P_T = \beta P_K + P_0 = \left(\frac{S_T}{U} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_N}{S_N} \right)^2 P_K + P_0 \quad (5)$$

其中, β 为变压器负载系数, U 和 U_N 分别为变压器的实际电压和额定电压。

以变压器本体为边界条件, 节电力计算式为:

$$\Delta(\Delta P) = (P_0 - P'_0) + \left(\frac{P'_{\max}}{\cos \varphi} \right)^2 \left(\frac{P_k}{S_N^2} - \frac{P'_k}{S_N'^2} \right) \quad (6)$$

节电量损耗计算式为:

$$\Delta(\Delta E) = \left[(P_0 - P'_0) + \left(\frac{P'_{\max} k_f}{S_N \cos \varphi} \right)^2 P_k - \left(\frac{P'_{\max} k_f}{S_N'^2 \cos \varphi'} \right)^2 P'_k \right] T \quad (7)$$

其中, k_f 是改造后功率均方根值与平均值折合系数。

3.3 无功补偿的量化

无功补偿(即无功功率补偿)技术在电力供电系统中起提高电网功率因数的作用, 能有效地降低供电变压器及输送线路的损耗, 提高供电效率, 改善供电环境。电网无功补偿的方式如图4所示, 主要分为变电站集中补偿(方式一)、配电变压器低压集中补偿(方式二)、线路补偿(方式三)和用户终端分散补偿(方式四)4种, 由于配电变压器低压侧集中补偿和用户终端分散补偿主要由用户投资及维护, 不计在电网企业统计范围内, 所以只统计变电站集中补偿和线路补偿两种方式^[10]。并联电容器的损耗计算模型如图5所示, 由无损电容 C 与电阻 R 并联而成。电阻支路 i_R 表示流过电容器的泄漏电流和其内部的极化电流, 是有功损耗, 电容支路流过的是无功 i_C , 代表无功损耗。 i_R 与 i_C 比值 $\tan \delta$ 是电容器的介损正切值。电容器的损耗可表示为:

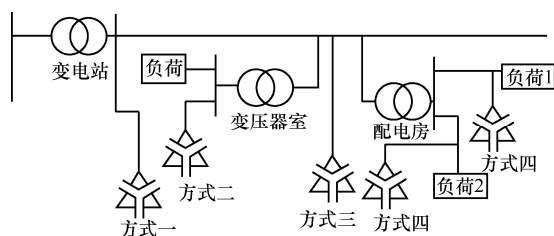


图4 中低压无功补偿配置方案

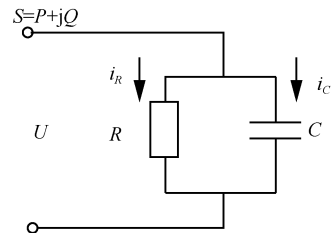


图5 电容器损耗计算等效电路

$$P_C = I_R^2 U = I_C \tan \delta U = U \omega C \tan \delta \cdot U = U^2 \omega C \tan \delta = Q \tan \delta \quad (8)$$

计算并联无功补偿项目能量时的边界条件为自无功补偿电源点至上一级无功补偿电源点之间所有串接的线路和变电设备, 如图6所示, 图6中虚线框内即并联无功补偿项目边界条件。

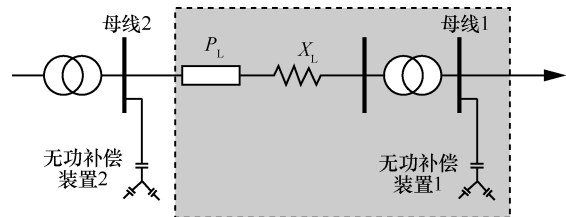


图6 并联无功补偿项目边界条件示意图

并联无功改造项目的总损耗为:

$$\Delta P'_{\text{总}}(t) = \Delta P_L(t) + \Delta P_T(t) = \frac{P^2 + (Q - Q_C)^2}{U^2} R + P_0 + \frac{P^2 + (Q - Q_C)^2}{S_N^2} P_k + Q_C \cdot \tan \delta \quad (9)$$

所以总的节电力为:

$$\Delta(\Delta P) = \frac{Q^2 - Q_C^2}{U^2} \cdot R - Q_C \cdot \tan \delta \cdot 10^{-3} = Q_C \cdot (C - \tan \delta) \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

其中, U 为项目边界内上下两级补偿点之间所有串接原件的基准额定电压, 单位为 kV。

R 为项目边界内所有串联元件归算至基准电压下的等效电阻值, 单位为欧姆 (Ω), C 为无功经济当量, 单位为 kW/kvar:

$$C = \frac{R}{U^2} \cdot (2Q' + Q_C) \quad (11)$$

节电量为:

$$\Delta(\Delta E) = \sum_{i=1}^n \Delta(\Delta P_i) T_i \quad (12)$$



其中, $\Delta(\Delta P_i)$ 是项目第 i 种工况下的节电力, 单位为 kW; T_i 为项目第 i 种工况下的补偿装置运行时间, 单位为 h。

4 节能量测量的实现

首先利用电力系统综合分析程序 PSASP 建立参数模型, 将网络中电流通过元件的有功损耗视为变压器等值电阻 R_T 和线路等值电阻 R_L 产生的有功损耗。通过测量值修正参数模型并完成后台相关服务设置^[11]。同时, 设计新的基于物联网的智能节能量测量装置, 装置内置电力计量专用芯片 ATT7022B、P89V51RD2 单片机及通信模块。电力计量专用芯片 ATT7022B 负责实时采集测量点处的三相电压和电流/频率、有功、无功及功率因数等数值, P89V51RD2 单片机处理完采集的数据后, 利用通信模块将数据传至后台计算机完成节能量优化计算。负责数据采集的智能传感器安装于补偿装置出线处(测量点 1)、线路中所有变压器的低压端(测量点 2)、线路出线端(测量点 3)及线路首段(测量点 4), 各测量点安装位置如图 7 所示。

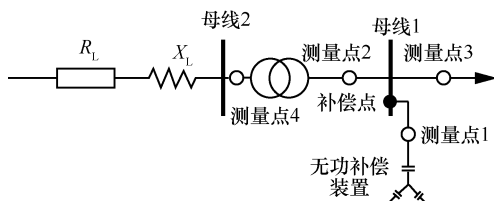


图 7 基于物联网的测量仪表安装示意图

智能电离监测装置与智能传感器结合, 利用物联网感知数据、可靠传输和智能处理等, 可以实现节能量参数的精确采集和计算。

5 实例分析

节能项目量化计算方法已应用到电网自身节能工程的节电量计算工作中, 研究成果为电网企业提供了节电量量化理论计算基础。

5.1 线路改造项目

在 2016 年 2 月—2017 年 6 月期间, 甘肃省

13 个地市公司实施线路改造项目 246 项(其中兰州 40 项、白银 18 项、天水 106 项、金昌 4 项、嘉酒 9 项、张掖 0 项、武威 2 项、定西 2 项、平凉 40 项、庆阳 11 项、陇南 13 项、甘南 1 项、临夏 0 项), 节约电量为 9 583.204 kW·h。线路改造项目节电量的计算式简化为:

$$\text{节约电量} = 3 \times I_{\text{线路平均}}^2 \times (\text{改造前单位线长电阻} - \text{改造后单位线长电阻}) \times (\text{线路长度} \times 8\,760 \times \frac{\text{运行月数}}{10^7 \times 12}) \quad (13)$$

经计算所得甘肃省线路改造节电量如图 8 所示。

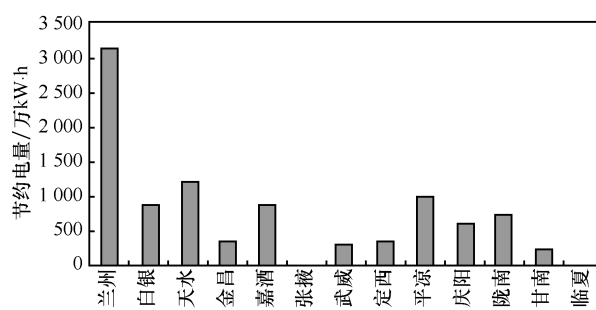


图 8 线路改造项目节约电量

5.2 高效变压器应用项目

在 2016 年 2 月—2017 年 6 月期间, 甘肃省 13 个地市公司实施高效变压器应用项目 349 项(其中兰州 13 项、白银 44 项、天水 169 项、金昌 29 项、嘉酒 0 项、张掖 4 项、武威 1 项、定西 0 项、平凉 30 项、庆阳 6 项、陇南 11 项、甘南 0 项、临夏 42 项), 节约电量为 887.353 kW·h。高效变压器项目节电量计算式简化为:

$$\begin{aligned} \text{节电量} = & (\text{改造前空载损耗} - \text{改造后空载损耗}) + \\ & (\text{改造前短路损耗} \times \\ & \left(\frac{\text{改造后容量} \times \text{改造后平均负载率}^2}{\text{改造前容量}} \right)^2 - \\ & \text{改造后短路损耗} \times \text{改造后平均负载率}^2) \times \\ & \frac{8\,760}{10\,000} \times \frac{\text{运行月数}}{12} \quad (14) \end{aligned}$$

经计算, 甘肃省高效变压器应用项目节电量如图 9 所示。

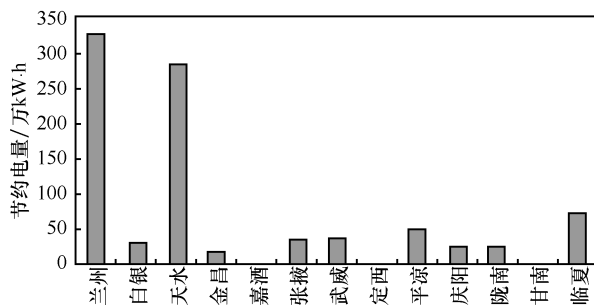


图9 高效变压器应用项目节约电量

5.3 新增无功补偿装置项目

截至2013年6月，甘肃省13地市公司实施无功补偿项目72项（其中兰州7项、白银16项、天水8项、金昌8项、嘉酒6项、张掖5项、武威4项、定西8项、平凉0项、庆阳3项、陇南0项、甘南0项、临夏7项），节约电量为16 301.81 kW·h。

加装并联无功补偿装置后的节电量 $\Delta(\Delta P)$ 计算式简化如下：

$$\begin{aligned} \text{节约电量} = & Q \times (\text{无功经济当量} - \\ & \text{电容器介损角正切值}) \times \\ & \frac{\text{等效小时} \times \text{运行月数}}{10\,000 \times 12} \end{aligned} \quad (15)$$

经计算，甘肃省新增无功补偿装置节电量如图10所示。

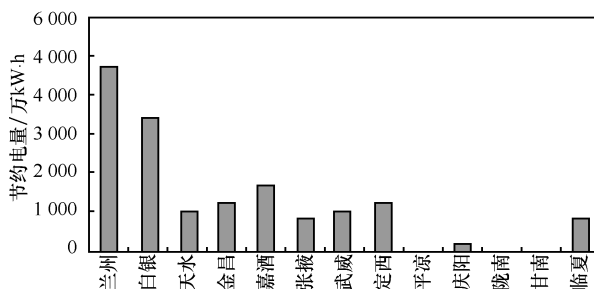


图10 新增无功补偿装置节约电量

根据节电量测评结果，实施电网节能工程项目改造后，年节约电量为26 772.37万kW·h，年节约电力为4.7426万kW。按照发展和改革委员会2010年的统计数据，发电煤耗为335 g/kW·h，则改造后一年的节电量折合节约煤量约为89 687.439 5 t，按每度电价为0.5元，则可节约资

金13 386.185万元。

利用物联网技术，采用节能量计算的新算法，甘肃电网节能量测量的实例充分验证了本文测量节电量方法的有效性。

6 结束语

在节能降损的大前提下，电力企业需要准确地测量节能量，本文利用节能量测量和验证技术通则对电网工程节能项目的节能量计算进行了总结，通过物联网技术，采用智能电力监测装置，精确地采集测量数据，融合节能量的新算法，并以甘肃省电网实施无功补偿措施为例介绍了测量节能量的过程和方法，验证了节能量量化的结果，可以为电力企业节能量计算提供一定的参考依据。

参考文献：

- [1] 谢书鸿, 何仓平, 徐拥军. 输电线路节能增效技术发展[J]. 中国电力, 2012, 45(8): 15-19.
XIE S H, HE C P, XU Y J. Development of energy saving & efficiency increasing technology for transmission lines[J]. Electric Power, 2012, 45(8): 15-19.
- [2] 何泳洪. 浅谈配电变压器节能降耗措施[J]. 电气工程与自动化, 2011, 312(30): 34-35.
HE Y H. Discussion on energy saving and consumption reduction measures of distribution transformer[J]. Mechanical and Electrical Information, 2011, 312(30): 34-35.
- [3] 韦奉青. 合同能源管理项目节能量测量和验证方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
WEI F Q. Research on energy conservation measurement and validation method for energy management contract projects[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [4] 郭艳飞, 苗常海, 成岭, 等. “基期能耗-影响因素”模型法的应用[J]. 节能技术, 2016, 34(1): 41-43.
GUO Y F, MIAO C H, CHENG L, et al. Application of the “base energy consumption-influencing factor” model method[J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(1): 41-43.
- [5] 鲁广明, 谢昶, 吕颖, 等. 基于分层区间数可能度排序的不确定静态安全分析[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 39-46.
LU G M, XIE C, LV Y, et al. Uncertain static security analysis based on hierarchical interval number possibility ranking[J].



Power System Technology, 2018, 42(4): 39-46.

- [6] 周优, 谭洪卫, 陈义波, 等. 基于电力数据的办公建筑能耗模拟方法[J]. 建筑节能, 2017, 45(4): 124-128.

ZHOU Y, TAN H W, CHEN Y B, et al. Simulation of energy consumption based on power data of office building[J]. Building Energy Efficiency, 2017, 45(4): 124-128.

- [7] 中国国家标准化管理委员会. 节能量测量和验证技术通则: GB/T28750-2012[S]. 2012.

Standardization Administration of the People's Republic of China. General principles of energy conservation measurement and verification technology: GB/T28750-2012[S]. 2012.

- [8] 董佳霖. 电网节能降耗关键技术效果测量与实证研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.

DONG J L. Measurement and empirical study on key technologies of energy conservation and loss reduction in power grid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.

- [9] 刘杉, 余军, 贺之渊, 等. 基于 VSC 与 LCC 混合的多点传输直流输电系统拓扑结构研究与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 163-171, 331.

LIU S, YU J, HE Z Y, et al. Research on topology structure and characteristic analysis of multipoint transmission HVDC system based on VSC and LCC hybrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 163-171, 331.

- [10] 邢士发. 融合营销数据的配网电能损耗计算方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.

XING S F. Research on calculation method of distribution network power loss based on marketing data[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2017.

- [11] 姜洁良. 数据中心能效案例及节能运行[J]. 电信科学, 2019, 35(1): 95-104.

LOU J L. Data center energy efficiency case and energy-saving operation[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(1): 95-104.

[作者简介]



张大品 (1966—), 男, 国网甘肃综合能源服务有限公司副总经理、高级工程师, 主要研究方向为电网技术、电力系统自动化及降损节能技术。



欧清海 (1970—), 男, 北京国电通网络技术有限公司副总经理、教授级高级工程师, 主要从事电力信息通信技术方面的研究工作。



何业慎 (1979—), 男, 深圳市国电科技通信有限公司科技部总经理、市场营销中心总经理, 主要研究方向为智能电网通信技术、系统集成技术、物联网及安全技术等。



张翼英 (1973—), 男, 博士, 天津科技大学“海河学者”特聘教授, 主要研究方向为物联网及其安全、安全密钥、智能电网等。