

潮流频繁切换下计及变压器健康运行的新型电力系统 配电网综合调控策略

朱孟兆¹, 黄莘杰², 顾朝亮¹, 朱文兵¹, 方斯頓², 杨丽君²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250003;

2. 重庆大学 电气工程学院 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 新型电力系统建设背景下大量高比例可再生能源接入配电网, 改变了配电网内部潮流分布, 带来了“输-配”网间潮流频繁切换的典型场景, 变压器正向和反向送电过载引起变压器寿命衰减加剧, 导致其处于非健康运行状态。对此, 文中提出一种潮流频繁切换下计及变压器健康运行的配电网综合调控新策略。引入变压器热寿命损失计算模型, 明确变压器负载率与绝缘寿命具有强正相关性, 将潮流频繁切换下变压器内部特性变化纳入考虑, 进而构建包含变压器负载率上限阈值约束的配电网可控资源协调管控措施并提出相应求解策略, 在保证配电网电压安全性和经济性的基础上针对性的改良变压器运行工况, 通过 IEEE 33 改进系统仿真分析表明, 所提方法能有效降低各场景下的变压器最大负载率, 为变压器健康运行提供科学指导。

关键词: 配电网; 潮流频繁切换; 变压器; 健康运行; 新型电力系统

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.05.005

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)05-0038-11

Comprehensive control strategy considering transformer health operation of novel power system distribution network under frequent power flow switching

ZHU Mengzhao¹, HUANG Xinjie², GU Zhaoliang¹, ZHU Wenbing¹, FANG Sidun², YANG Lijun²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250003, China.

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: With the construction of the novel power system, a large proportion of renewable energy is being integrated into the distribution network, changing the internal power flow of the distribution network, resulting in frequent power switching occurring between the transmission and distribution networks. To address the issue of transformer life degradation exacerbated by forward or reverse power transmission overload, this paper proposes a coordinated control strategy for various types of controllable resources in the distribution network to optimize transformer life under frequent current switching. A transformer life calculation model is introduced, clarifying the strong positive correlation between transformer load rate and insulation life. The internal changes of the transformer under frequent current switching are considered, and a coordinated control measure for controllable resources in the distribution network including a constraint on the upper threshold of transformer load rate is constructed and a corresponding solution strategy is proposed. This measure effectively improves the operating conditions of the transformer while ensuring the safety and economy of the distribution network voltage. Simulation analysis on the improved IEEE 33-system shows that the proposed method can effectively reduce the maximum load rate of the transformer under various scenarios, providing scientific guidance for optimizing transformer life.

Keywords: distribution network, frequent power flow switching, transformer, health operation, novel power system

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5500-202316535A-3-2-ZN)

0 引言

新型电力系统建设背景下, 可再生能源是推动

我国绿色、清洁、低碳发展的重要手段^[1],截至 2024 年 3 月底,全国风光发电总装机容量突破 11 亿千瓦,同比增长 40%,配电网可再生能源并网容量超 2.8 亿千瓦^[2]。由于并网风光出力的随机性和波动性使配电网“源-荷”不平衡现象频繁出现,造成“输-配”网间潮流方向频繁改变。变压器作为新型电力系统下输配网协同运行的关键设备,承担着变换电压、传输电能等重要任务^[3]。因此,延长变压器运行寿命,提高设备可靠性,对电力系统安全稳定运行具有重要作用^[4]。

然而,频繁的潮流切换严重影响着电力变压器的运行可靠性。如国网某供电公司监控数据显示,某 SZ10-6300/110 型主变在一日内最大逆送电负载率和正向输电负载率分别达 66% 和 75%,反向送电期间油温较同等负载下正向送电相比升高 1~2℃,且噪声振动增加。为保证变压器趋于健康运行状态,有必要对其绝缘寿命损失进行优化,一般认为电力变压器的寿命取决于绕组绝缘纸的热寿命,其与运行温度、环境湿度和氧气浓度息息相关,其中运行温度的影响最为显著^[5]。目前,已有大量科研人员采用较高温度下的加速热老化试验方法,研究在不同温度和运行环境下,油纸绝缘相对老化速率或绝缘纸聚合度(degree of polymerization, DP)随时间下降的规律,并外推至较低运行温度下以评估变压器的绝缘寿命^[6]。变压器热特性、绝缘寿命及负载能力相互关联,绕组热点温度越高,变压器绝缘老化速率越快^[7]。因此,可以通过改善变压器热点温度的方式来优化配电网变压器运行寿命。

文献[8-9]表明变压器热点温度与负载率具有强相关性,并建立了不同负载率和环境温度下绕组热点温度的评估模型。在变压器高负荷长时间运行条件下,其热点温度可能超过 90℃,极大程度加速了绝缘纸纤维的老化和性能的退化。为改善变压器运行负载情况,文献[10]通过开展变压器动态载荷能力评估,在不同场景下进行验证,提出可根据变压器运行状态设置风险约束裕度,提升变压器利用率。文献[11-12]均利用配电网网络重构的手段,考虑变压器在一段时间内的寿命延长,通过优化变压器负载情况,进而降低热点温度,最终得到最佳的配电网拓扑结构,其中文献[11]针对输配间相连的主变压器,文献[12]则考虑配电网中所有变

压器,并使负载均衡度最优。文献[13-14]通过研究电动汽车接入配电网对变压器寿命的影响,提出电动汽车智能充电策略,防止变压器出现重载。但以上研究均针对变压器单向送电场景,并未考虑潮流反送带来变压器运行特性的改变。因此,为降低变压器正向和反向送电期间负载水平,延长潮流频繁切换下变压器运行寿命,在配电网安全运行的基础上,需综合考虑多类型可控资源的协调管理。

文献[15]通过深度神经网络拟合电容器组、有载调压变压器及可再生能源逆变器的动作函数,对具有无功调节能力的设备进行协调控制,以此达到抑制网损的目的。文献[16]利用深度强化学习采集节点和设备状态及属性信息作为环境变量,并基于此协调操作配电网多类型控制器,最小化设备操作费用。文献[17]利用协同进化遗传算法对可再生能源、储能的出力进行优化,并表明多资源联合优化可提高配电网运行经济性。文献[18]结合双模驱动方法对主动配电网有功-无功资源进行协调优化调度,获得具有经济效益的管控策略。文献[19]建立面向多元可控资源的多阶段运营策略,在保障模型求解效率的基础上,提高配电网可靠性。综上所述,现有配电网综合调控策略主要以保障电网电压安全性和经济性为目标,极少数融合考虑变压器使用寿命,且有关变压器的协调优化策略均忽略内阻的影响。

针对上述研究的不足,本文提出一种潮流频繁切换下计及变压器健康运行的新型电力系统配电网综合调控策略新策略,主要研究内容包括:首先,以变压器热点温度计算模型为基础,建立负载率与变压器相对老化速度和寿命损失的数学联系。其次,深入考虑潮流频繁切换下变压器内部特性,提出一种融合变压器寿命的多类型资源组合式优化策略,针对不同可再生能源接入水平,采用适应性的协调管理手段,以保障配电网经济性和电压安全为前提,改善变压器负载状态,降低变压器寿命损失,提升运行可靠性,实现变压器精细化管理。最后,基于改进 IEEE-33 验证所提方法的有效性与实用性。

1 变压器热寿命损失计算模型

1.1 变压器绕组热点温度计算模型

本论文采用《负载导则》提供的简化模型来描述电力变压器内部的热分布,如图 1 所示。

构模型,如式(14)、式(15)所示:

$$\begin{cases} V_{i,t} - V_{j,t} \geq r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t} - M(1 - \alpha_{ij}) \\ V_{i,t} - V_{j,t} \leq r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t} + M(1 - \alpha_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\sum \alpha_{ij} = n - n_s \quad (15)$$

式中: M 为一足够大的数; α_{ij} 表示线路开关状态,为0-1变量; n 为配电网节点总数, n_s 为变电站数量。针对系统无负荷节点可添加极小负荷值以增强径向性,但对潮流无明显影响^[23]。

2.2.2 有载调压变压器模型

1) 潮流频繁切换下变压器阻抗特性模型。

现有研究中往往将有载调压(on load tap changing, OLTC)变压器视作理想元件,但实际工程应用中其内部阻抗存在分压现象,有必要建立适用于潮流频繁切换工况的变压器特性模型。图2和图3分别为正反向送电变压器简化等效电路模型。

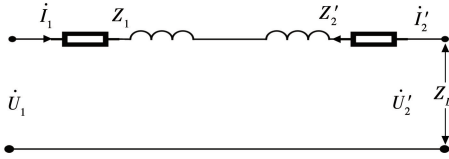


图2 正向送电变压器简化等效电路模型

Fig. 2 Simplified equivalent circuit model for transformer in forward power delivery

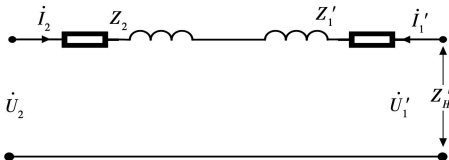


图3 反向送电变压器简化等效电路模型

Fig. 3 Simplified equivalent circuit model for transformer in reverse power delivery

图2中,正向送电时将内部参数归算到高压侧,为刻画内阻分压现象,引入短路阻抗 $a\%$ (可由短路实验获得),在额定电流下建立如式(16)所示的平衡方程。

$$U_{1N}(1 - a\%) = koU_{2N} \quad (16)$$

式中: U_{1N} 为高压侧实际注入电压; ko 为变压器当前变比; U_{2N} 为低压侧实际输出电压。

图3中,反向送电时变压器一二次侧发生交换,需将内部参量归算到低压侧运算。经变压器高低压侧参数等价替换后,此时一二次侧电压平衡方程如式(17)所示。

$$U'_{1N} = koU'_{2N}(1 - a\%) \quad (17)$$

式中: U'_{1N} 为高压侧实际输出电压; U'_{2N} 为低压侧实际输出电压。在变压器研制期间,副边匝数往往较理论值设计更多,以抵消单向送电工况下变压器内阻分压,但在新型电力系统配电网中,反向潮流工况时常出现,为保证变压器高压侧电压恒定,必须要提升低压侧电压,对配电网综合调控带来挑战^[24]。

2) 变压器调压模型。

配电网中 OLTC 调压模型如式(18)~式(24),其主要通过调节挡位来改变变比。

$$V_{H,t} = B_{olte,t} \times V_{L,t} \quad (18)$$

$$B_{olte,min} \leq B_{olte,t} \leq B_{olte,max} \quad (19)$$

$$B_{olte,t} = B_{olte,min} + \Delta B \times b_t \quad (20)$$

$$\delta_{up,t} + \delta_{dn,t} \leq 1 \quad (21)$$

$$b_t - b_{t-1} \geq \delta_{up,t} - \delta_{dn,t} \times SR \quad (22)$$

$$b_t - b_{t-1} \leq \delta_{up,t} \times SR - \delta_{dn,t} \quad (23)$$

$$\sum (\delta_{up,t} + \delta_{dn,t}) \leq N_{olte,max}^{olte} \quad (24)$$

式中: $V_{H,t}$ 和 $V_{L,t}$ 分别为变压器高低压侧电压; $B_{olte,t}$ 为 t 时刻变压器变比;式(19)表示变比可调上下限; ΔB 表示单位调节步长; b_t 为 t 时刻挡位大小;式(21)~式(24)表示 OLTC 日内使用次数限制; $\delta_{up,t}$ 和 $\delta_{dn,t}$ 为挡位变化状态量; $\delta_{up,t}$ 为1时向上调档; $\delta_{dn,t}$ 为1时向下调档; SR 表示最大可达挡位; $N_{olte,max}^{olte}$ 表示日内最大动作次数。

此外,为降低 OLTC 整数变量对优化策略求解所带来的压力,本论文采用了文献[25]的方式,对 OLTC 变比建模进行简化,如式(25)~式(28)所示,实现变比连续化。

$$B_{olte,t} = B_{olte,min} + \Delta B \sum_{j=1}^{N_{olte}} T_{j,t} 2^{j-1} \quad (25)$$

$$\Phi(y_j) = \sqrt{y_j^2 + (1 - y_j)^2 + \lambda} - 1 = 0 \quad (26)$$

$$B_{olte,t} = B_{olte,min} + \Delta B \sum_{j=1}^{N_{olte}} y_j 2^{j-1} \quad (27)$$

$$0 \leq y_j \leq 1 \quad (28)$$

式(25)为对式(19)中 OLTC 最高挡位进行二进制编码后的改进方程,将 OLTC 变比转换为0-1变量的线性组合, N_{olte} 为0-1变量个数, $T_{j,t}$ 为 t 时刻 OLTC 的第 j 个0-1变量;式(26)表示利用 NCP 函数将连续变量 y_j 光滑逼近0-1, λ 为光滑参数,其取值越小,0-1变量约束越准确,如图4所示。式(27)为 OLTC 变比的连续变量表达式;式(28)为 y_j 的变化区间。

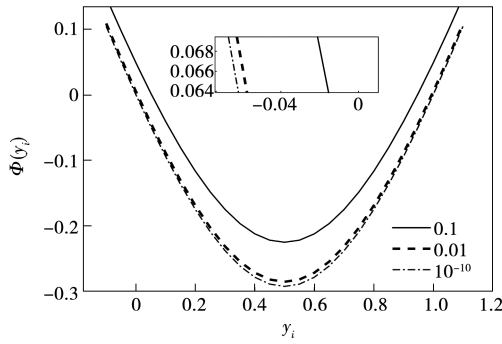


图 4 不同 λ 取值下 0-1 变量逼近效果
Fig. 4 Approximation effect of 0-1 variables under different λ values

2.2.3 无功补偿装置模型

为简化计算,本文对离散电抗器组和电容器组进行连续化建模,如式(29)所示。

$$RPC_{\min} \leq RPC_t \leq RPC_{\max} \quad (29)$$

式中: RPC_t 为 t 时刻无功出力,无功变化范围从负到正。无功补偿装置每日仍有动作次数限制,其约束可借鉴式(21)~式(24)来构建。

2.2.4 储能系统模型

本文所建立的储能模型如式(30)~式(34)。

$$ESS^t = ESS^{t-1} + \left(\frac{P_c^{t-1} \eta_c - P_d^{t-1}}{\eta_d} \right) \Delta t \quad (30)$$

$$ESS_{\min} \leq ESS^t \leq ESS_{\max} \quad (31)$$

$$u_{d,t} + u_{c,t} \leq 1 \quad (32)$$

$$0 \leq P_c^t \leq u_{c,t} P_{c,\max} \quad (33)$$

$$0 \leq P_d^t \leq u_{d,t} P_{d,\max} \quad (34)$$

式中: ESS^t 表示 t 时刻储能电池电量; η_c 和 η_d 表示充放电效率; $u_{c,t}$ 和 $u_{d,t}$ 表示 t 时刻充放电状态; P_c^t 和 P_d^t 表示 t 时刻充电功率和放电功率; $P_{c,\max}$ 和 $P_{d,\max}$ 表示充放电功率的极值。

3 变压器寿命优化模型求解策略

本论文以配电网调度运行成本最低为优化目标,建立如式(35)所示的目标函数。

$$\min F = \sum_{t=1}^T z_1 \max \{0, P_t\} \Delta t + \sum_{t=1}^T z_2 \min \{0, P_t\} \Delta t + \sum_{z=1}^{N_{DG}} \sum_{t=1}^T c_z P_{RES,z,t} \Delta t \quad (35)$$

式中: T 表示调度周期时间长度; P_t 表示配电网与上级输电网联络线传递的功率,为正表示从上级输电网购电,为负表示向上级输电网售电; z_1 和 z_2 为购电和售电单位电价; N_{DG} 为在配电网中并网的可再生能源发电机总数; c_z 为风光上网电价; Δt 表示单位时长。式(35)中第一项表示配电网购电成本,

第二项表示配电网售电利润,第三项表示可再生能源发电成本。

为保障高比例可再生能源接入带来潮流频繁切换工况下变压器运行性能,由以上研究可知,变压器寿命损失主要受负载率影响,因此,本文引入 T 内变压器实时负载率的上限约束,如式(36)所示。

$$\sum \sqrt{(P_{12,t}^2 + Q_{12,t}^2)} / C_{\max} \leq \beta_{\max} \quad (36)$$

式中: $C_{\max}$ 为变压器容量; $\beta_{\max}$ 为调度周期内系统调度方案所能承受的变压器负载率总和极值,其可将调度周期内变压器负载率总和作为目标函数获取。但式(36)具有非线性,可利用辅助变量 φ 对其等效,如式(37)所示。

$$\begin{cases} \varphi^2 = P_{12,t}^2 + Q_{12,t}^2 \\ \varphi \geq 0 \end{cases} \quad (37)$$

在此基础上,本文提出基于新型电力系统配电网多类型可调资源的变压器协调管理新策略,如图5所示。其具体分析步骤如下所示:1)首先在新型电力系统配电网中生成风光出力场景集作为运行工况;2)其次,确定变压器视在功率和上限,基于1)生成的不同风光场景,在保证配电网经济性目标和电压安全的前提下,融合考虑潮流频繁切换时变压器自身特性,依次投入配电网多种可调资源,且当前手段无法满足配电网电压安全时,新增调节措施。最终优化变压器运行工况,降低周期内变压器运行负载率峰值,保证变压器健康运行。

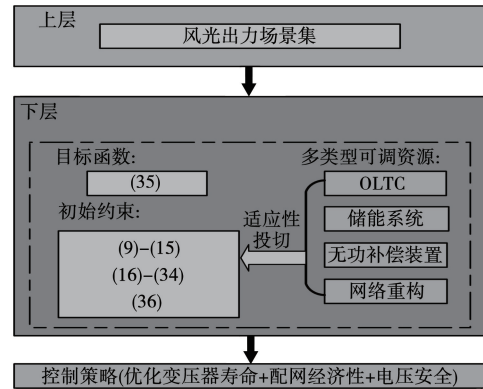


图 5 基于新型电力系统配电网多类型可调资源的变压器协调管理新策略

Fig. 5 New coordination management strategy for transformers based on multiple types of adjustable resources in the distribution network

4 算例分析

4.1 算例系统描述

本论文采用改进 IEEE 33 节点系统来验证所提策略的有效性,如图 6 所示。

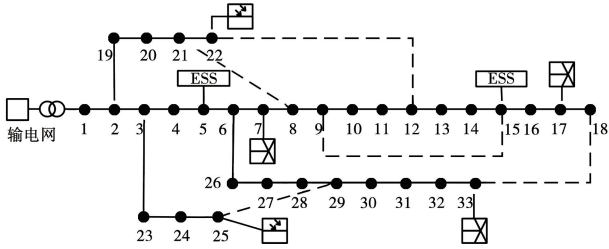


图 6 仿真测试系统结构

Fig. 6 Simulation testing system structure

其中节点 7、节点 13、节点 33 处各接入一个风力发电系统,节点 22、节点 25 处各接入一个光伏发电系统,其出力由中国北方某地历史实际出力等比例放缩得到,源荷各自归一化变化趋势由图 7 所示,储能系统连接至节点 5 和节点 15,容量为 0.8 MW,最大充放电上限为 0.3 MW。系统节点电压波动范围为 0.95 ~ 1.05,OLTC 动作范围设置为 $0.95 + 10 \times 1\%$,其日动作次数不超过 2 次,变压器容量为 2.5 MW, $a\%$ 取 2%,且假定变压器副边匝数设计值比理论值高 2%,环境温度设置为 25 ℃,变压器特性参数如表 1 所示^[26]。

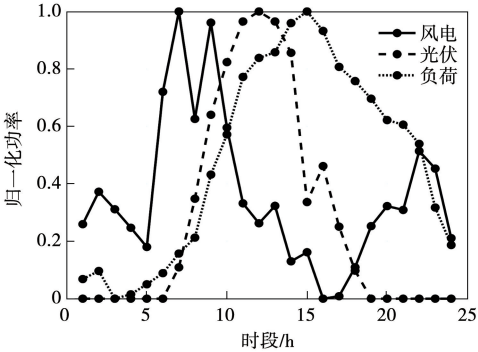


图 7 风-光-荷归一化功率

Fig. 7 Normalized power of wind-solar-load

表 1 变压器特性参数

Tab. 1 Transformer characteristic parameters

参数	数值
顶层油温计算指数	1.0
绕组热点温升计算指数	0.8
损耗比	6
额定负载下绕组顶部油温升/K	56
额定负载下热点对绕组顶部油的温差/K	22
顶层油时间常数/min	150
绕组时间常数/min	5

文中所有的算例均在 Intel(R) Core(TM) i5-13400F CPU @2.50 GHz、16 GB RAM 硬件环境下测试。目标函数中,购电单价取 1 元/(kW·h)^[27],售电单价取 0.35 元/(kW·h)^[28],可再生能源上网电价取

0.4 元/(kW·h)^[29], λ 参考文献[25]取 1×10^{-10} ,基于 MATLAB 2022b,利用商业求解软件 Gurobi 进行求解。

4.2 多类型控制手段组合下配电网变压器负载优化分析

为说明图 5 所建立的融合变压器健康运行的配电网多类型可调资源协调管控策略,本小节将按风光接入量由小到大进行分析,其中风光渗透率采用能量渗透率的定义^[30]。

1) 场景 1:无风光接入。

该场景下系统 24 h 负载率变化趋势如图 6 所示。由图 8 可知,当系统中无风光接入时,不会发生潮流反送现象,变压器出现重载或过载的原因在于正向送电平衡负荷导致,一天中最大负载率可达 117%。

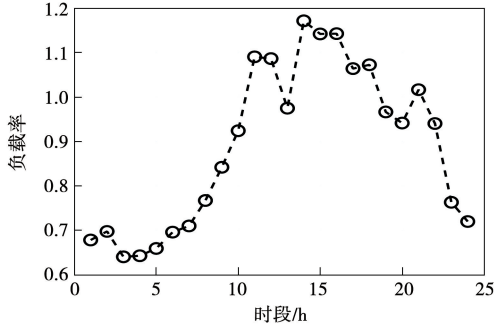


图 8 无可再生能源接入下变压器负载率变化

Fig. 8 Variations in transformer load rate without renewable energy access

2) 场景 2:风光渗透率为 60%。

由于在场景下可再生能源渗透水平不高,配电网电压安全可仅依靠 OLTC 和储能系统便可保证,变压器寿命也利用该手段进行优化,图 9 为负载率优化前后的结果,OLTC 变动与潮流交换情况如图 10 所示。

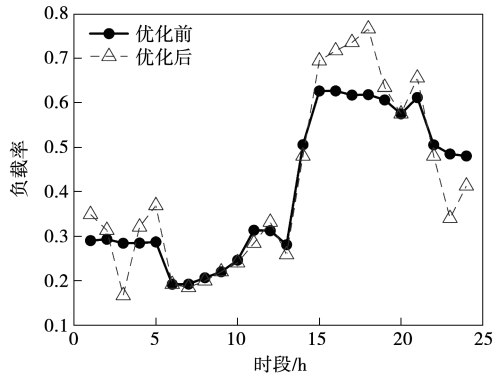


图 9 场景 2 下优化前负载率情况

Fig. 9 Load rate status before optimization in scenario 2

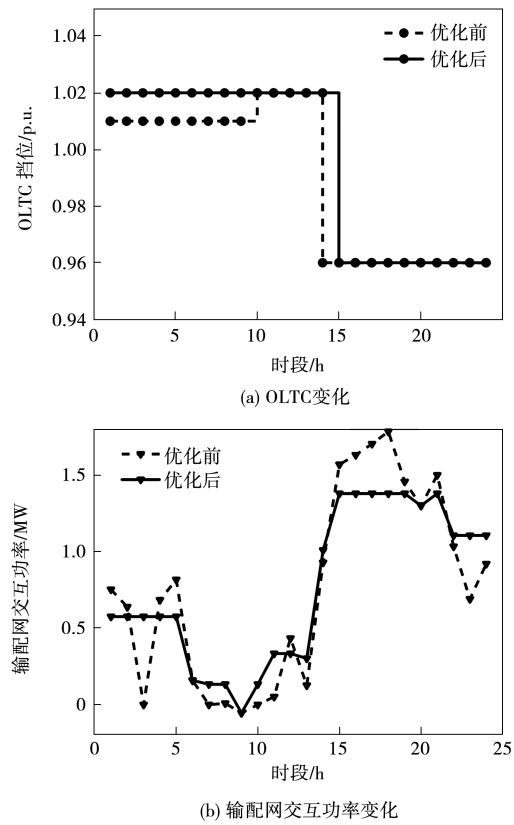


图 10 场景 2 下优化前后配电网运行状态变化
Fig. 10 Variations in the operating status of the distribution network before and after optimization under scenario 2

由以上图形可知,适度风光接入下难以发生潮流反向的情况,从图 10(a)可知,场景 2 变压器负载率峰值仍由正向送电导致,通过协调控制 OLTC 和储能装置动态调整系统有功无功分布,相比纯负荷情况能有效降低变压器正向通电期间负载率,优化前后变压器运行情况如表 2 所示,其中下列热点温度是以最大负载率运行 1 h 的结果。

表 2 场景 2 下优化前后变压器属性信息
Tab. 2 Variations in transformer attribute information before and after optimization under scenario 2

最大负载率/%		热点温度/℃		相对老化速率	
优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
76.3	62.3	51.12	44.10	0.004 4	0.002 0

3) 场景 3: 风光渗透率为 100%。

随着风光接入占比的逐渐升高,反向潮流的现象逐渐严重,为优先保障系统电压安全,需在场景 2 可调资源的基础上进一步引入无功补偿装置,其调节范围设置为 $-0.4 \text{ Mvar} \sim 0.4 \text{ Mvar}$,动作梯度为

0.1 Mvar ,配置位置为 3、11 及 30 节点,日动作次数限制为 10 次,进而在变压器运行工况调节的基础上,对配电网进行综合调控。图 11 为该场景下输-配网间功率交互情况,图 12 为该场景下负载率优化前后的结果。

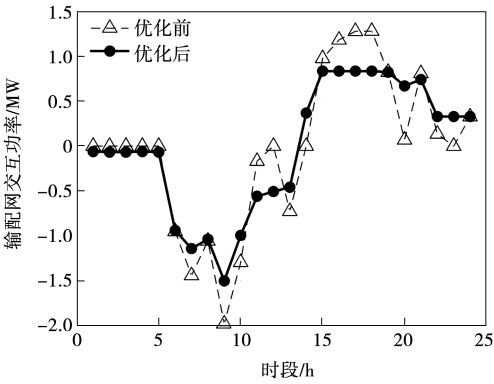


图 11 场景 3 下优化前后输配电网功率交互情况
Fig. 11 Power interaction situation between distribution and transmission networks before and after optimization under scenario 3

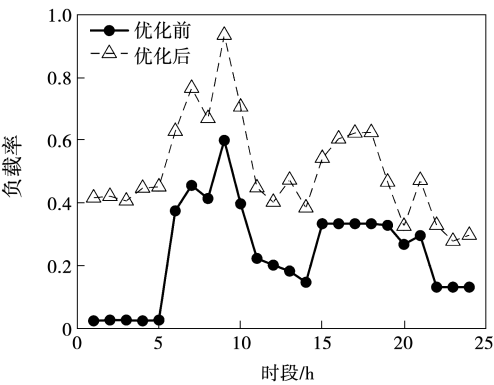


图 12 场景 3 下优化前后负载率情况
Fig. 12 Variations in transformer load rate before and after optimization under scenario 3

由图 11 可知,场景 3 下变压器反向送电传输的功率大于正向送电,其运行过载主要是由于反向送电导致。由图 12 可知,通过无功补偿装置的加入进一步优化系统潮流分布,进而改变变压器输出视在功率,降低变压器正反送电负载率水平,优化前后变压器运行情况如表 3 所示。

表 3 场景 3 下优化前后变压器属性信息
Tab. 3 Variations in transformer attribute information before and after optimization under scenario 3

最大负载率/%		热点温度/℃		相对老化速率	
优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
96.7	58.3	63.28	42.29	0.018 1	0.001 6

4) 场景 4: 风光渗透率为 123%。

随着可再生能源渗透率的进一步提高, 保证配电网电压安全愈加困难, 需要在场景 3 的基础上引入网络重构等调节手段, 日动作次数限制为 1 次, 优化前后变压器运行情况如表 4 所示。

表 4 场景 4 下优化前后变压器属性信息
Tab. 4 Variations in transformer attribute information before and after optimization under scenario 4

最大负载率/%		热点温度/℃		相对老化速率	
优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
116	94.3	76.83	61.74	0.086 6	0.015 2

由于网络重构本身具有平衡负载、消除过载等作用, 通过优化运行可获得与负荷最佳匹配的网络拓扑结构, 如图 13 所示。

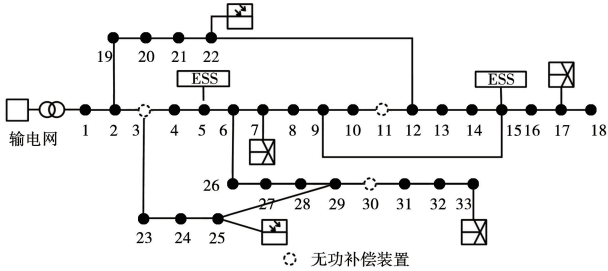


图 13 重构后的 IEEE 33 拓扑结构

Fig. 13 IEEE 33-topology after reconfiguration

4.3 潮流频繁切换工况下变压器运行特性对配电网优化策略的影响

以场景 4 为例, 采用 OLTC、储能、无功补偿装置作为调控手段, 将忽略变压器特性的现有方法作为对比控制手段, 最终结果如表 5 所示。

表 5 变压器内阻对配电网综合调控策略效果的影响
Tab. 5 Influence of transformer internal resistance on the effectiveness of comprehensive control strategies for distribution network

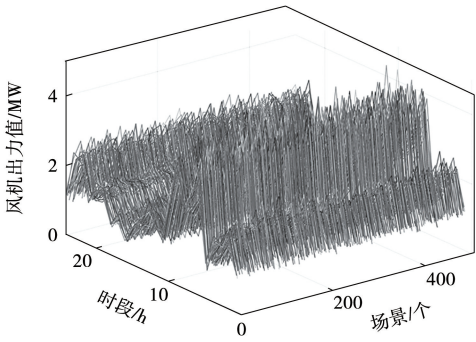
方法	电压越限点/个
考虑变压器内阻	62
不考虑变压器内阻	0

由表 5 可知, 由于忽略了设备的自身属性, 传统方法控制裕度较高, 在 33×24 个节点电压中未越限点数量更多, 但这会导致调度人员错误评估配电网综合调控手段的电压控制效果。在对计及变压器健康运行下配电网经济性和电压优化策略的制

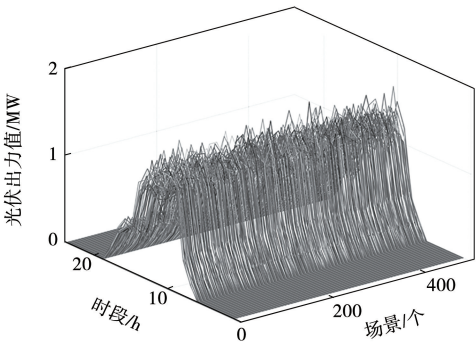
定时带来不利影响。

4.4 强风光出力波动工况下配电网变压器负载优化分析

风、光具有较强的波动性和不确定性, 使“源-荷”不平衡现象在一天内频繁出现, 导致“输-配”网间潮流方向改变多次。为刻画风光不确定性对配电网优化运行的影响, 且鉴于风、光出力预测误差通常服从正态分布^[31]。以场景 3 中 100% 风光渗透率为基准, 设风光预测误差标准差为 10%, 利用蒙特卡洛生成 500 个随机出力场景, 如图 14 所示。在此基础上, 利用快速前代消除技术将图 14 中 500 个场景削减为 5 个场景, 形成风光出力场景集, 并保持对原始场景集的良好近似, 如图 15 所示。



(a) 风电出力场景集



(b) 光伏出力场景集

图 14 风光出力随机集

Fig. 14 Random set of wind and solar power output

针对图 15 所获得的 5 个不同场景, 由于 OLTC、无功补偿装置及网络重构手段有日内动作次数限制, 灵活调度有局限性, 为有效应对强不确定性工况, 本小节在上述调节手段的基础上增加可实时变动的风光无功出力, 其功率因数设置为 0.95, 进而再对变压器运行工况优化, 各场景具体结果如表 6 所示。

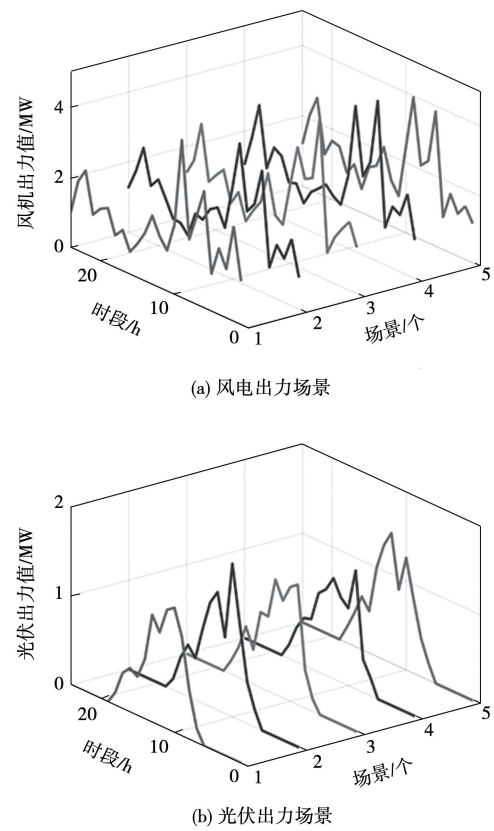


图 15 风光出力不确定场景集

Fig. 15 Scenery set with uncertain wind and solar output

表 6 不确定场景集下优化前后变压器属性信息

Tab. 6 Variations in transformer attribute information before and after optimization under uncertain set

场景	最大负载率/%		热点温度/℃		相对老化速率	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
1	159	115	113.85	76.08	6.23	0.079
2	145	100	100.75	65.46	1.38	0.023 3
3	118	69.8	78.34	47.72	0.10	0.003
4	115	82.3	76.08	54.46	0.079	0.006 5
5	125	74.9	83.80	50.37	0.19	0.004 1

由表 6 可知,所采用的多类型资源协调管控策略可有效应对强风光出力不确定性工况,并能显著降低各场景集下的变压器热寿命损失。

5 结论

随着风光等新能源出力在新型电力系统配电网中逐渐增大,“输-配”网间潮流方向改变的现象频繁发生,正送和反送时变压器均有重载或过载出现,务须对变压器制定负载优化策略,以此提升变

压器运行可靠性,保证变压器健康运行,且考虑到配电网自身电压安全问题,本文提出一种潮流频繁切换下计及变压器健康运行的新型电力系统配电网综合调控新策略,在改进 IEEE-33 系统上进行验证,所得到结论如下:

- 1) 适度范围内接入风光发电机组能有效降低变压器负载率,在风光渗透率为 60% 的场景 2 相比于场景 1 纯负载情况,未优化前变压器负载率降低 34.7%。
- 2) 本文针对不同可再生能源渗透率情况,在配电网中采用不同的可调资源组合方式,有效优化变压器负载状态并保证配电网电压安全和运行经济性,随着风光渗透率增加,可调资源类型逐渐增多。且忽略变压器内阻会高估配电网综合调控手段的实际作用。
- 3) 鉴于变压器热寿命损失与负载率强相关,文章所提策略可有效降低不同渗透率下正向或反向送电期间变压器的负载率极值,减小变压器寿命损失,进而促进变压器健康运行。

参考文献

[1] 曹宏宇, 梁言贺, 刘惠颖, 等. 考虑风-光-储不确定性的新型电力系统概率潮流计算[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 87-93.
CAO Hongyu, LIANG Yanhe, LIU Huiying, et al. Probabilistic power flow calculation of novel power system considering uncertainty of wind-light-storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 87-93.

[2] 国家能源局. 国家能源局 2024 年二季度新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2024-04-29)[2024-05-17]. https://www.nea.gov.cn/2024-04/29/c_1310773184.htm.

[3] 杜江, 孙铭阳. 基于变权灰云模型的变压器状态层次评估方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4306-4316.
DU Jiang, SUN Mingyang. Hierarchical assessment method of transformer condition based on weight-varying grey cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4306-4316.

[4] 王雷, 楚明月, 王晓华, 等. 基于随机森林的智能变电站一次侧设备运行状态监测方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 184-190.
WANG Lei, CHU Mingyue, WANG Xiaohua, et al. Research on monitoring method of primary equipment operation state in intelligent substation based on random forest [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 184-190.

[5] 张鑫, 王伟, 马昊, 等. 干式变压器绝缘试样活化能与

- 热老化程度的关联特性[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(3): 9-16.
- ZHANG Xin, WANG Wei, MA Hao, et al. Correlation between activation energy and thermal aging degree of insulating samples from dry-type transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(3): 9-16.
- [6] DING H Z, WANG Z D. On the degradation evolution equations of cellulose[J]. Cellulose, 2008, 15(2): 205-224.
- [7] 吕志华, 顾雅青. 基于卡尔曼滤波算法的油浸式变压器绕组热点温度预测研究[J]. 变压器, 2024, 61(4): 44-49.
- LÜ Zhihua, GU Yaqing. Research on prediction of winding hot spot temperature of oil-immersed transformer based on Kalman filter algorithm[J]. Transformer, 2024, 61(4): 44-49.
- [8] 钱瞳. 油浸式电力变压器热模型研究及负载能力评估[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- QIAN Tong. An investigation into thermal modelling and loading capability of oil-immersed power transformer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器第7部分: 油浸式电力变压器负载导则: GB/T 1094.7—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 张琛, 董旭柱, 阮江军, 等. 面向典型负荷曲线的油浸式电力变压器动态载荷能力评估方法[J/OL]. 电网技术, 1-12 [2024-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20240507.1757.004.html>.
- ZHANG Chen, DONG Xuzhu, RUAN Jiangjun, et al. Dynamic thermal rating assessment method of oil-immersed power transformers based on typical load profiles[J]. Power System Technology, 1-12 [2024-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20240507.1757.004.html>.
- [11] UCAR B, BAGRIYANIK M. Reconfiguration of distribution network for transformer life extension using quasi-static time-series analysis[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(3): 1703-1713.
- [12] 黄炎光, 易鹭, 蔡亚楠. 基于配网重构的在役低压配电变压器寿命优化[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 38-42, 92.
- HUANG Yanguang, YI Lu, CAI Yanan. Life optimization strategy of LV distribution transformer in service based on distribution network reconfiguration[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 38-42, 92.
- [13] 刘星. 电动汽车接入对配电变压器使用寿命影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- LIU Xing. Research on the impact of plug-in Electric vehicles on the operating life of the distribution transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [14] 孙建龙, 李妍, 胡国伟, 等. 电动汽车接入对配电变压器使用寿命的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3830-3835.
- SUN Jianlong, LI Yan, HU Guowei, et al. Impact of plug-in electric vehicles on the operating life of distribution transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3830-3835.
- [15] 邓清唐, 胡丹尔, 蔡田田, 等. 基于多智能体深度强化学习的配电网无功优化策略[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(2): 10-20.
- DENG Qingtang, HU Daner, CAI Tiantian, et al. Reactive power optimization strategy of distribution network based on multiagent deep reinforcement learning[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(2): 10-20.
- [16] 张华赢, 艾精文, 汪伟. 基于约束型深度强化学习的主动配电网电压控制策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 159-166.
- ZHANG Huaying, AI Jingwen, WANG Wei. Volt/var control strategy for active distribution network based on constrained deep reinforcement learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 159-166.
- [17] 许多红, 郭靖琪, 丁筱筠, 等. 基于协同进化遗传算法的配电网风光储联合经济调度[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(6): 51-57.
- XU Duohong, GUO Jingqi, DING Xiaoyun, et al. Economic dispatch of distribution network with wind-solar-battery system based on co-evolutionary genetic algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(6): 51-57.
- [18] 张剑, 崔明建, 姚潇毅, 等. 基于数据驱动与物理模型的主动配电网双时间尺度协调优化[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 64-71.
- ZHANG Jian, CUI Mingjian, YAO Xiaoyi. Dual time-scales coordinated and optimal voltages control in distribution systems using data-driven and physical optimization[J]. Automation of Electric Power System, 2023, 47(20): 64-71.
- [19] YAO F X, MIAO S H, WANG T T, et al. A resilience-oriented multi-stage operation strategy for distribution networks considering multi-type resources[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1290168.
- [20] IEC. Power transformers-part 7: loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7: 2005[S]. Geneva: IEC, 2005.
- [21] SONG Y, ZHENG Y, LIU T, et al. A new formulation of distribution network reconfiguration for reducing the voltage volatility induced by distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 496-507.

- [22] 杜晓东, 李晓明, 韩思宁, 等. 基于线性化潮流模型的配电网电压无功控制策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 41-47.
DU Xiaodong, LI Xiaoming, HAN Sining, et al. Volt/var control strategy of distribution network based on linearized power flow model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 41-47.
- [23] 方斯顿, 黄莘杰, 孔赖强, 等. 含储能健康运行域与电压安全约束的配电网重构方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-11 [2023-09-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20230919.1453.015.html>.
FANG Sidun, HUANG Xinjie, KONG Laiqiang, et al. Distribution network reconfiguration method with health operating area of energy storage life and voltage security constraints[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-11 [2023-09-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20230919.1453.015.html>.
- [24] 黄莘杰, 方斯顿, 罗颖冰, 等. 双向潮流下考虑储能系统状态耦合特性的配电网电压协调管理策略[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-12 [2024-06-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240613.1305.009.html>.
HUANG Xinjie, FANG Sidun, LUO Yingbing, et al. A coordinated voltage management for distribution network considering the state coupling characteristics of energy storage systems under bi-directional power flow[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-12 [2024-06-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240613.1305.009.html>.
- [25] 王艳艳, 李生虎, 雷庆坤, 等. 基于变比连续化的风电系统 OLTC 电压控制灵敏度算法[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2016, 40(2): 54-61.
WANG Yanyan, LI Shenghu, LEI Qingkun, et al. Sensitivity algorithm of OLTC for voltage control to wind power systems based on transforming tap changes to continuous variables[J]. Journal of Anhui University(Natural Science Edition), 2016, 40(2): 54-61.
- [26] 付豪. 新能源接入变电站低压侧对电力变压器的影响研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.
FU Hao. Study on the influence of new energy accessing substation low side on power transformer[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021.
- [27] TEWARI T, MOHAPATRA A, ANAND S. Coordinated control of OLTC and energy storage for voltage regulation in distribution network with high PV penetration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 12(1): 262-272.
- [28] 窦迅, 王俊, 叶飞, 等. 考虑虚拟电厂组合策略的售电公司优化调度及购售电决策[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2078-2086.
DOU Xun, WANG Jun, YE Fei, et al. Optimal dispatching and purchase-sale decision making of electricity retailers considering virtual power plant combination strategies[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3961-3970.
- [29] 仲苏亮. 稳步推进中国可再生能源平价上网的必要性及相关政策建议[J]. 中外能源, 2019, 24(5): 15-20.
ZHONG Suliang. Necessity analysis and policy proposals for steadily promoting grid parity of China's renewable energy[J]. Sino-Global Energy, 2019, 24(5): 15-20.
- [30] 赵波, 张雪松, 洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 95-100.
ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, HONG Bowen. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic sources integrated into smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 95-100.
- [31] LU L, YUAN W L, SU C G, et al. Optimization model for the short-term joint operation of a grid-connected wind-photovoltaic-hydro hybrid energy system with cascade hydropower plants[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 114055.

收稿日期: 2024-07-09; 修回日期: 2024-10-10

作者简介:

朱孟兆(1980—),男,博士,正高级工程师,研究方向为变电设备故障诊断与分析。E-mail:xiaozhupost@163.com

黄莘杰(1999—),男,硕士研究生,研究方向为配电网电压管理、储能系统优化运行。

E-mail:1419563714@qq.com

顾朝亮(1989—),男,博士,高级工程师,研究方向为变压器类设备试验检测、状态评价及故障分析。

E-mail:792372434@qq.com

朱文兵(1980—),男,博士,高级工程师,研究方向为电力设备状态监测与故障诊断。E-mail:zhwebing@163.com

方斯顿(1991—),男,通信作者,博士,教授,研究方向为综合能源系统。E-mail:ICIES_CQU@163.com

杨丽君(1980—),女,博士,教授,研究方向为大型电力变压器内绝缘老化机理及寿命预测。

E-mail:ylycqu@cqu.edu.cn

(编辑 杜景飞)