

面向逆向过载的配电网变压器多时间尺度寿命优化策略

朱孟兆¹, 朱文兵¹, 顾朝亮¹, 朱庆东¹, 吉佳旺², 方斯頓²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250003;

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

摘要: 随着风电、光伏等新能源在配电网中的渗透率不断提高,传统配电网正逐步向多源供能、双向潮流的复杂新型电力系统演变。然而,潮流频繁切换可能导致变压器逆向送电过载,加速其寿命衰减。为此,文章提出了一种面向逆向过载的配电网变压器多时间尺度寿命优化策略。文中分析了有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)调控机制及负载率对变压器寿命损耗的影响,进而构建配电网协调调度模型。该模型以降低变压器损耗成本和配电网综合运行成本为优化目标,通过日前与日内滚动优化调度策略,在变压器逆向过载场景下实现寿命优化,基于改进的 IEEE-33 节点系统进行算例验证。结果表明,所提出的方法能够有效降低潮流频繁切换条件下的变压器逆向负载率,在减少变压器寿命损耗的同时降低综合运行成本,从而显著提升配电网变压器在逆向过载工况下的运行寿命,提高系统的安全性和经济性。

关键词: 配电网; 逆向过载; 变压器; 多时间尺度; 寿命优化

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.10.013

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)10-0139-12

Multi-time scale life optimization strategy for distribution network transformer facing reverse overload

Zhu Mengzhao¹, Zhu Wenbing¹, Gu Zhaoliang¹, Zhu Qingdong¹, Ji Jiawang², Fang Sidun²

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

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

Abstract: With the increasing penetration of new energy such as wind power and photovoltaic in distribution network, the traditional distribution network is gradually evolving into a complex new power system with multi-source energy supply and two-way power flow. However, frequent power flow switching may lead to reverse power overload of the transformer and accelerate its life decay. Therefore, this paper proposes a multi-time scale life optimization strategy for distribution network transformers facing reverse overload. The regulation mechanism of on-load tap changer (OLTC) and the influence of the load rate on the transformer life loss are analyzed, and then, the coordinated scheduling model of distribution network is constructed. The model aims to reduce the transformer loss cost and the comprehensive operation cost of the distribution network, and realizes the life optimization in the transformer reverse overload scenario through the day-ahead and intra-day rolling optimization scheduling strategy. An example is verified based on the improved IEEE-33 node system. The results show that the proposed method can effectively reduce the reverse load ratio of the transformer under the condition of frequent power flow switching, reduce the life loss of the transformer and reduce the comprehensive operation cost, so as to significantly increase the operation life of the transformer under the reverse overload condition, and improve the safety and economy of the system.

Keywords: distribution network, reverse overload, transformer, multi-time scale, life optimization

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

0 引言

随着风光等新能源在配电网中的占比不断提

升,传统的单一电源供电模式逐渐转向多源并存、易发生双向潮流的复杂新型电力系统^[1]。这种转型对配电网的运营模式带来了深刻的变化,尤其是在“输-配”网间潮流频繁切换的情况下,变压器面临逆向送电过载的挑战,导致其寿命加速衰减^[2-3]。因此,提出一种兼顾变压器寿命优化与配电网高效运行的调控策略,对于提升系统安全性、经济性具有重要意义。

配电变压器是电力系统的重要设备,承担着电压变换和功率分配的任务^[4,5]。然而,频繁的潮流切换会显著影响配电网的运行,带来电压安全问题,并对变压器的热点温度和使用寿命产生影响^[6]。通常认为,电力变压器绝缘元件的老化状况是影响其使用寿命的重要因素。当前,影响变压器绝缘老化速度的主要因素为变压器工作环境的温度、湿度和氧气密度。检测结果表明,变压器的“热区”通常是变压器绝缘老化最严重的部位,它的温度变化极大地影响着它的绝缘寿命。为了保证变压器的经济运行,精确地获得其热点温度是十分重要的^[7]。

文献[8]提出了一种基于温度监测和历史运行数据分析的变压器寿命预测方法,通过结合历史数据建立老化模型,预测变压器的剩余寿命,从而有效延长其使用寿命。文献[9]研究了不同冷却方式对变压器热点温度的影响,提出通过改进冷却系统可以有效降低热点温度,减缓绝缘材料的老化速度。综上所述,通过对变压器工作过程中的温升控制,可降低其老化速率,进而实现潮流频繁切换下的变压器寿命优化。

此外,文献[10]指出,变压器绕组的热点温度与负载率相关,有效控制热点温度,可以显著延长变压器的使用寿命。文献[11]通过构建变压器热稳定安全约束,以限制其最大负载率,实现变压器安全运行的同时,降低相对寿命损失。文献[12]研究了分布式能源接入对变压器寿命的影响,分析了光伏和风力发电系统接入配电网对变压器运行状态的影响,并提出了基于分布式能源输出特性的变压器负载优化方法,以减轻负载压力,延长使用寿命。文献[13]针对电动汽车无序充电行为对配电网内变压器寿命的潜在影响展开研究,提出了一种智能充电策略,通过优化充电时间分配,有效防止变压器出现重载现象,在降低变压器损耗的同时,保障配电网的稳定运行。文献[14]则研究了储能

系统在延长变压器寿命中的应用,提出通过在高负载时段使用储能系统进行削峰,降低变压器的热点温度,从而提升运行可靠性和寿命。然而,上述研究未能充分考虑潮流反送的影响。因此,为了在保障配电网安全运行的基础上,降低正反向送电期间的负载水平,延长潮流频繁切换下的变压器运行寿命,需综合考虑多种可控资源的协调控制。

文献[15-16]均利用配电网网络重构的方法,考虑变压器在一定时间内的寿命延长,通过优化负载情况,降低热点温度,从而得出最佳配电网拓扑结构。文献[17]提出了一种通过日前优化控制电容器组和 OLTC 等设备以平抑电压波动的策略。在实时优化阶段,该策略则利用静止无功发生器(static var generator, SVG)、分布式发电(distributed generation, DG)等设备来调节电压分布,从而优化配电网运行。文献[18]根据负荷预测及新能源如光伏发电的功率状况,以系统的总运营成本最小为目标,通过及控制柴油发电机、储能装置和其它调节装置的工作状态,实现负荷率的优化,并对新能源的输出与负荷进行滚动优化调整,制定并严格执行日内调度计划。综上所述,现有的配电网优化调度研究大多以经济性和安全性为主要目标,往往忽视了在潮流频繁切换的复杂运行条件下,变压器寿命优化的重要性。通过调整负载率来延长变压器的使用寿命仍然存在研究不足,特别是在面对双向潮流和高渗透率分布式能源的场景下。

针对新型电力系统中潮流频繁切换下对变压器逆向过载导致寿命急剧损耗的问题,提出了一种面向逆向过载的配电网变压器多时间尺度寿命优化策略,以优化变压器寿命并提升配电网运行效率。研究内容主要包括以下几个方面:

首先,构建考虑负载率影响的变压器寿命模型,深入分析热点温度与负载率对变压器寿命损耗的作用机理,并引入负载率约束以提升模型的适用性。其次,构建以最小化配电网网损、变压器损耗及储能装置运行成本为目标的优化调度模型,结合配电网拓扑重构策略,优化变压器负载率,提出了日前-日内多时间尺度的变压器寿命优化方法。最后,基于 IEEE-33 节点系统开展仿真分析,验证所提方法的有效性。结果表明,该方法在保障系统安全性与经济性的同时,能够显著降低变压器损耗,延缓其寿命衰减,为新型电力系统中变压器的高效、可靠运行提供了理论支撑与优化策略。

1 考虑负载率及热点温度的变压器寿命模型

1.1 考虑热点温度影响的变压器寿命损失模型

变压器相对热老化速率^[19] (relative thermal aging rate, RTAR) 的概率分布是变压器寿命研究中的一个重要方面。它反映了变压器在不同温度下的绝缘材料老化速率,从而影响变压器的寿命。

但在变压器工作时,铁芯及线圈所引起的损失,会以传导、对流、辐射等三种形式向外部环境传播^[20]。在此过程中,变压器线圈绕组的最大温升集中于其热斑,其对应的温度即为“热点温度”^[21]。将热点温度 θ_h 定义为环境温度 θ_a ,顶层油相对环境温升 $\Delta\theta_o$ 和绕组热点相对顶层油温升 $\Delta\theta_h$ 部分的总和:

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_o + \Delta\theta_h = 1 + \left(\frac{\beta^2 R}{1+R}\right)^x \cdot \Delta\theta_{or} - k_{11} \cdot \tau_o \cdot \frac{d\theta_o}{dt} + \beta^y \cdot \Delta\theta_{hr} - k_{22} \cdot \tau_w \cdot \frac{d\Delta\theta_{hl}}{dt} + \frac{\tau_o}{k_{22}} \cdot \frac{d\Delta\theta_{h2}}{dt} \quad (1)$$

式中: β 为变压器负载率; $\Delta\theta_{hr}$ 为标准负荷下热点温度与油箱内顶层热点温度的差值; $\Delta\theta_{or}$ 为标准负荷下油箱内顶层热点温度与周围环境瞬态温度的差值; R 为额定负荷下铜、铁损耗比; τ_w 为绕组时间常数; τ_o 为油时间常数; x 为顶层油指数,油自然冷却 (oil natural, ON) 方式的配电变压器选取为 0.8; y 为绕组指数,ON 与强迫油循环冷却 (oil forced, OF) 方式的配电变压器均选取为 1.6; k_{11} , k_{22} 为变压器不同类型定值。

其中热点温度与变压器绝缘老化速率的关系式定义如下:

$$V = 2^{(\theta_h - 98)/6} \quad (2)$$

式中: V 为变压器绝缘老化速率。

对相对热老化速率在一定周期内进行积分,即可求出负荷周期内变压器的相对寿命损失,如下所示:

$$LOL = \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} V dt \text{ 或 } L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V \quad (3)$$

式中: t_0 为负荷周期的时间起点; t 为负荷周期的时间长度; N 为时间段总数; LOL 为变压器相对寿命损失。

1.2 热点温度与负载率对变压器寿命损失影响

以式(1)为依据,变压器热点温度对负载率进行求导,得:

$$\frac{d\theta_h}{d\beta} = y \cdot \beta^{(y-1)} \cdot \Delta\theta_{hr} + x \cdot \left(\frac{1+\beta^2 R}{1+R}\right)^{x-1} \cdot \frac{2\beta R}{1+R} \cdot \Delta\theta_{or} \quad (4)$$

结合式(2)、式(3),可求得变压器寿命损失对热点温度的导数如下:

$$\frac{dLOL}{d\theta_h} = \frac{1}{6} \cdot 2^{\frac{\theta_h - 98}{3}} \quad (5)$$

通过复合函数的微分法得到如下关系:

$$\frac{dLOL}{d\beta} = \frac{dLOL}{d\theta_h} \cdot \frac{d\theta_h}{d\beta} = \frac{1}{6} \cdot 2^{\frac{\theta_h - 98}{3}} \cdot y \cdot \beta^{(y-1)} \cdot \Delta\theta_{hr} + \frac{1}{6} \cdot 2^{\frac{\theta_h - 98}{3}} \cdot x \cdot \left(\frac{1+\beta^2 R}{1+R}\right)^{x-1} \cdot \frac{2\beta R}{1+R} \cdot \Delta\theta_{or} \quad (6)$$

由于变压器的参数的 θ_h , x , y , R 和 $\Delta\theta_{hr}$ 等均为正值,可推算出当 $\beta > 0$ 时, $dLOL/d\beta$ 恒大于 0,也就是说,变压器的寿命损耗与负载率成正比。因此,降低变压器的负荷率,也可以降低其使用寿命,从而达到变压器的使用寿命优化的目的。

图 1 显示了不同负载等级下变压器的热点温度及相对寿命损失变化。其中, A、B、C 三点分别对应同一台变压器在不同负载率下的运行状态。通过对比分析可见,随着负载率升高,变压器的热点温度显著上升, LOL 亦呈非线性增长,表明其老化速率显著加快。具体而言,尽管从点 C 至点 B、再到点 A 的负载率均以 20% 为递增步长,但 LOL 的增幅并不均衡:由 B 至 A 的 LOL 增长量约为由 C 至 B 的 4 倍,反映出高负载运行对变压器绝缘寿命具有显著的加速损耗效应。

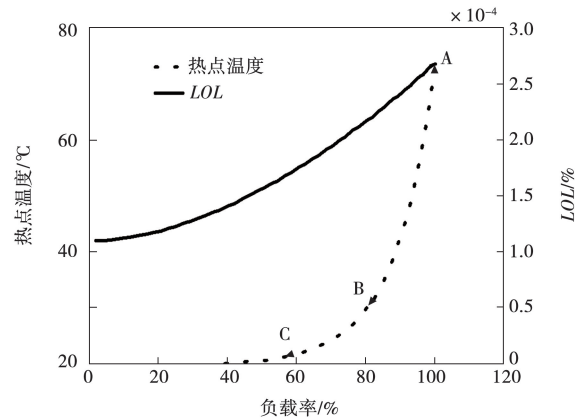


图 1 热点温度、变压器寿命损失和变压器负载的关系曲线

Fig. 1 Relationship curves of hot spot temperature, transformer life loss and transformer load

1.3 考虑负载率约束的有载调压变压器模型

文章的 OLTC 模型采用含 π 形电路串联 1 个变比为 k_{ij} 的理想变压器模型,具体如下:

$$V_{f,t} = k_{ij} V_{j,t} \quad (7)$$

$$k_{ij} = k_{ij,N} + t_{apij} \Delta k_{ij} \quad (8)$$

$$\Delta k_{ij} = \frac{k_{ij,\max} - k_{ij,N}}{t_{apij,\max}} \quad (9)$$

$$k_{ij,\min} \leq k_{ij}(t) \leq k_{ij,\max} \quad (10)$$

式中: $V_{f,t}$, $V_{j,t}$ 分别为变压器 1, 变压器 2 侧 t 时刻电压值; $k_{ij,N}$, $k_{ij,\min}$, $k_{ij,\max}$, t_{apij} , $t_{apij,\max}$ 分别为支路 ij 中 OLTC 变比的额定值, 最小值, 最大值, 分接头档位(其中额定变比对应档位为 0, 大于额定值的变比对应档位为正, 反之则为负)及其最大值。

由于高负载率将加剧变压器寿命老化速率, 因此文中引入变压器负载率约束如下所示:

$$\sqrt{(P_{12,t}^2 + Q_{12,t}^2)} / C^{\text{cap}} \leq \beta_{\max} \quad (11)$$

式中: $P_{12,t}^2$, $Q_{12,t}^2$ 分别为 t 时刻变压器高低压绕组间的有功及无功功率; C^{cap} 为变压器容量; $\beta_{\max}$ 为变压器运行周期内的所能负担的最大负载率, 可将式(5)作为目标函数后参考获取, 在式(11)引入辅助变量 φ 进行线性化处理, 以便进行求解, 如下所示:

$$\varphi^2 = P_{12,t}^2 + Q_{12,t}^2 \quad (12)$$

2 配电网协调优化调度模型

2.1 目标函数

配电网运行总费用主要包括网损费用、变压器损耗费用以及储能设备运行费用, 故文中经济调度的总目标函数如下:

$$\min C = C_{\text{loss}} + C_{\text{tr}} + C_{\text{ess}} \quad (13)$$

式中: C 为总运行成本费用; C_{loss} 为配电网线路网损成本; C_{ess} 为储能设备运行成本; C_{tr} 为变压器损失成本。

2.1.1 配电网线路损耗成本

配电网线路损耗成本取决于分时电价及网络支路功率, 其定义如下:

$$C_{\text{loss}} = c_t^{\text{buy}} \sum_t \sum_k r_k \tilde{I}_k \Delta t, \quad k \in \Omega^{\text{branch}} \quad (14)$$

式中: c_t^{buy} 为购电成本系数; r_k 为支路 k 对应的电阻值; $\tilde{I}_k$ 为二阶锥转换后的电流的平方; Ω^{branch} 为配电网的支路集合。

2.1.2 变压器损耗成本

变压器的损失成本主要包括铁芯损耗和铜芯损耗, 其计算公式如下^[22]:

$$C_{\text{tr}} = c_t^{\text{buy}} \sum_{t=1}^T (L^{\text{fe}} + L^{\text{cu}} \beta_t^2) \Delta t \quad (15)$$

$$\beta_t = \sqrt{(P_t^{\text{tr}})^2 + (Q_t^{\text{tr}})^2} / C^{\text{ca}} \quad (16)$$

式中: L^{fe} , L^{cu} 分别为工作时变压器的额定铁损及铜

损; β_t 为 t 时刻变压器的负载率; C^{ca} 为变压器的额定容量。

2.1.3 储能设备运行成本

储能的运行费用主要包括充电和放电过程中的电力收入/费用和折旧费用^[23]。当储能设备的充放次数固定时, 每一次放电的寿命损耗可以大致相同, 具体运行成本如下:

$$C_{\text{ess}} = \sum_{t=1}^T \sum_i [c_t^{\text{buy}} (P_{i,t}^{\text{ess,c}} - P_{i,t}^{\text{ess,d}}) \Delta t] + c^{\text{life}}, \quad i \in \Omega^{\text{ess}} \quad (17)$$

$$c^{\text{life}} = \sum_i \left(\frac{\sigma_i^{\text{start}} c^{\text{esscost}} C_i^{\text{ca,ess}}}{n^{\text{life}}} \right) \quad (18)$$

式中: c^{esscost} 为储能设备建设成本, 单位为元/(kW·h); $P_{i,t}^{\text{ess,c}}$, $P_{i,t}^{\text{ess,d}}$ 分别为储能设备的充、放电功率; $C_i^{\text{ca,ess}}$ 为储能设备的容量; c^{life} 为总折旧成本; n^{life} 为储能设备的充电和放电总循环次数; σ_i^{start} 为储能设备充放电切换次数。

2.2 Distflow 支路潮流模型

在此基础上, 利用二阶锥松弛建立了 Distflow 支路潮流的数学模型^[24]:

$$\sum_{i \in u(j)} (P_{ij,t} - \tilde{I}_{ij,t} r_{ij}) = \sum_{m \in v(j)} P_{jm,t} + P_{j,t}^{\text{inj}}, \quad i, j, m \in \Omega^{\text{node}}, k(i, j) \in \Omega^{\text{branch}} \quad (19)$$

$$\sum_{i \in u(j)} (Q_{ij,t} - \tilde{I}_{ij,t} x_{ij}) = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk,t} + Q_{j,t}^{\text{inj}} \quad (20)$$

$$\tilde{U}_{j,t} = \tilde{U}_{i,t} - 2(P_{k,t} r_k + Q_{k,t} x_k) + \tilde{I}_{k,t} (r_k^2 + x_k^2) \quad (21)$$

$$\tilde{U}_{i,t} \tilde{I}_{k,t} = P_{k,t}^2 + Q_{k,t}^2 \quad (22)$$

$$P_{i,t}^{\text{inj}} = P_{i,t}^{\text{DG}} + P_{i,t}^{\text{ess}} - P_{i,t}^{\text{load}} \quad (23)$$

$$Q_{i,t}^{\text{inj}} = Q_{i,t}^{\text{DG}} + Q_{i,t}^{\text{SVC}} + Q_{i,t}^{\text{cb}} - Q_{i,t}^{\text{load}} \quad (24)$$

式中: $u(j)$ 为以 j 为末端节点的支路首端节点集合; $v(j)$ 为以 j 节点为首端的支路末端节点集合; $k(i, j)$ 为以 i 为首端、 j 为末端的支路; Ω^{node} 为配电网的节点集合; $P_{ij,t}$, $Q_{ij,t}$ 分别为流经支路 ij 的有功、无功功率; $P_{i,t}^{\text{inj}}$, $Q_{i,t}^{\text{inj}}$ 分别为注入节点 i 的有功和无功功率; x_k 为支路 k 对应的电抗值。

其中 $\tilde{U}_{i,t}$ 与 $\tilde{I}_{k,t}$ 满足如下关系:

$$\begin{cases} \tilde{I}_{k,t} = I_{k,t}^2 \\ \tilde{U}_{i,t} = U_{i,t}^2 \end{cases}, \quad i \in \Omega^{\text{node}}, k \in \Omega^{\text{branch}} \quad (25)$$

式中: $U_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压值; $I_{k,t}$ 为 t 时刻支路 k 的电流值。

因此, 式(21)可转换为二阶锥约束如下:

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{k,t} \\ 2Q_{k,t} \\ \tilde{I}_{k,t} - \tilde{U}_{i,t} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{k,t} + \tilde{U}_{i,t} \quad (26)$$

2.3 配网重构模型

通过配网重构,可对配电变压器进行负载调整,同时,配电网重构通过调节支路的导通和关断状态,实现了配电网的优化,减少了运行费用^[25-26]。在式(21)的基础上,通过引入 0-1 变量,利用大 M 方法对可通断支路进行潮流约束优化:

$$\sum_{i \in A} (\sigma_{i,t}^{\text{swi}} - 1) \leq \tilde{U}_{i,t} - \tilde{U}_{j,t} - 2(P_{k,t}r_k + Q_{k,t}x_k) + \tilde{I}_{k,t}(r_k^2 + x_k^2) \leq M(\sigma_{i,t}^{\text{swi}} + 1), \quad k(i,j) \in \Omega^{\text{swi}} \quad (27)$$

式中: M 为足够大的正数; Ω^{swi} 为可开关断的支路集合,包括联络开关支路和分段开关支路; $\sigma_{i,t}^{\text{swi}}$ 为支路开关的状态变量。

在此基础上,提出了以下限制条件,以确保重构后的分支不会产生环路,并保留配电网络的辐射性:

$$\sum_{i \in A} \sigma_{i,t}^{\text{swi}} \leq N_A^{\text{branch}} - 1, \quad A \in \Omega^A \quad (28)$$

$$\sum_{i \in B} \sigma_{i,t}^{\text{swi}} \leq N_B^{\text{branch}} - 1, \quad B \in \Omega^B \quad (29)$$

$$\sigma_{i,t}^{\text{swi}} = 1, \quad i \in \Omega^{\text{swi}} \quad (30)$$

$$\sum_{t=1}^{T-1} |\sigma_{i,t+1}^{\text{swi}} - \sigma_{i,t}^{\text{swi}}| + |\sigma_{i,1}^{\text{swi}} - \sigma_{i,T}^{\text{swi}}| \leq C^{\text{op1}} \quad (31)$$

式中: A 为一条环路; B 为一条连接 2 个变电站节点的支路; $N_A^{\text{branch}}, N_B^{\text{branch}}$ 分别为线路 A 与 B 的支路总数; Ω^A, Ω^B 分别为环状线路与相连的变电站线路的集合; Ω^{swi} 为不可开断支路集合; C^{op1} 为开关切换限制次数。

2.4 约束条件

1) 储能设备的充放电约束及功率约束:

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + \left(\eta P_{i,t}^{\text{ess},c} - \frac{P_{i,t}^{\text{ess},d}}{\eta} \right) \frac{\Delta t}{C_i^{\text{ca-ss}}} \quad (32)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ess},c} \leq \sigma_{i,t}^c P_{\max}^{\text{ess}} \quad (33)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ess},d} \leq \sigma_{i,t}^d P_{\max}^{\text{ess}} \quad (34)$$

$$0.1 \leq S_{i,t} \leq 1, i \in \Omega^{\text{ESS}} \quad (35)$$

式中: $S_{i,t}$ 为节点 i 接入的储能设备在 t 时刻的荷电状态(state of charge, SOC); η 为储能装置的充电和放电效率; $P_{i,t}^{\text{ess},c}, P_{i,t}^{\text{ess},d}$ 分别节点 i 接入的储能设备在 t 时刻的充电与放电功率; $C_i^{\text{ca-ss}}$ 为节点 i 接入储能装置的容量值; $\sigma_{i,t}^c, \sigma_{i,t}^d$ 为节点 i 接入的储能设备在 t 时刻的充电、放电状态,为 0-1 变量; Δt 为时间间

隔; $P_{\max}^{\text{ess}}$ 为储能装置充电和放电的最大功率值; Ω^{ESS} 为有储能装置接入的配电网节点集合。

2) DG 功率约束

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{DG}} \leq P_{i,t}^{\text{DG,max}} \quad (36)$$

$$-P_{i,t}^{\text{DG}} \times \tan \varphi \leq Q_{i,t}^{\text{DG}} \leq P_{i,t}^{\text{DG}} \times \tan \varphi \quad (37)$$

式中: P_i^{DG} 为节点 i 处接入 DG 发出的实际有功功率; $P_i^{\text{DG,max}}$ 为节点 i 处接入 DG 的有功预测出力; Q_i^{DG} 为节点 i 处接入 DG 发出的实际无功功率; φ 为功率因素角。

3) 节点电压约束

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (38)$$

式中: $U_{i,\max}, U_{i,\min}$ 为节点 i 电压的上下限值。

4) 支路容量约束

$$S_k \leq S_{k,\max} \quad (39)$$

式中: S_k 为支路 k 的流经的视在功率; $S_{k,\max}$ 为支路 k 流经功率的最大值。

5) 离散无功补偿装置约束

在配电网中,投切电容器组(capacitor bank, CB)和电抗器是常用的无功调控方式^[27],近似认为两者混合可以实现无功功率持续调节,每组容量一定,约束如下所示:

$$Q_{i,t}^{\text{cb}} = \sigma_{i,t}^{\text{cb}} Q_i^{\text{cbN}}, \quad i \in \Omega^{\text{cb}} \quad (40)$$

$$0 \leq \sigma_{i,t}^{\text{cb}} \leq \sigma_i^{\text{cb-max}} \quad (41)$$

$$\sum_{t=1}^{T-1} |\sigma_{i,t+1}^{\text{cb}} - \sigma_{i,t}^{\text{cb}}| + |\sigma_{i,1}^{\text{cb}} - \sigma_{i,T}^{\text{cb}}| \leq C_i^{\text{op2}} \quad (42)$$

式中: Ω^{cb} 为用于配电网无功调节的 CB 集合; $Q_{i,t}^{\text{cb}}$ 为节点 i 处接入 CB 在 t 时刻发出的无功功率; $\sigma_{i,t}^{\text{cb}}$ 为节点 i 处在 t 时刻的投切电容器组数; Q_i^{cbN} 为每组电容器组在节点 i 处发出的无功功率; $\sigma_i^{\text{cb-max}}$ 为在节点 i 处可投入最大电容器组数; C_i^{op2} 为接入节点 i 处的电容器调节操作量限值。

6) 连续无功调节装置约束

通过加入静态无功补偿(static var compensation, SVC)装置进行连续无功补偿,使得无功补偿更加精确,其模型如下:

$$Q_j^{\text{SVC,min}} \leq Q_j^{\text{SVC}} \leq Q_j^{\text{SVC,max}}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{SVC}} \quad (43)$$

式中: Q_j^{SVC} 为 t 时刻 j 节点处 SVC 无功补偿出力; $Q_j^{\text{SVC,max}}$ 和 $Q_j^{\text{SVC,min}}$ 为 j 节点处 SVC 无功补偿出力上下限; B^{SVC} 为用于配电网系统的 SVC 集合。

3 日前-日内多时间尺度变压器寿命优化策略

考虑到风电,光伏及电负荷的随机波动,提出了日前-日内多时间尺度变压器寿命优化策略,日

前以最小化线路损耗成本和储能设备运行成本为目标求解储能设备,联络开关状态以及 CB 调度计划,同时调节 OLTC 变比,日内滚动优化以最小化线路损耗成本和变压器损耗成本为目标对储能设备功率及 SVC 无功出力功率进行调整,以最大程度实现经济调度,同时进一步降低变压器损耗。

提出的考虑变压器寿命优化的配电网多时间尺度优化调度框架如图 2 所示。

1) 日前调度计划的时间尺度为 1 h, 调度周期为 24 h。在日前调度中需确定储能装置的开关状态及充放电状态,以及联络开关状态,CB 调度计划及 OLTC 变比。

2) 日内滚动优化的时间尺度为 15 min, 调度周期为 3 h。在日内滚动优化调度过程中,需要制定储能设备的功率及 SVC 无功功率出力调度计划,从而降低变压器损失成本。其中对日前调度计划中的储能设备及充放电状态,以及联络开关状态及 OLTC 变比均不变。

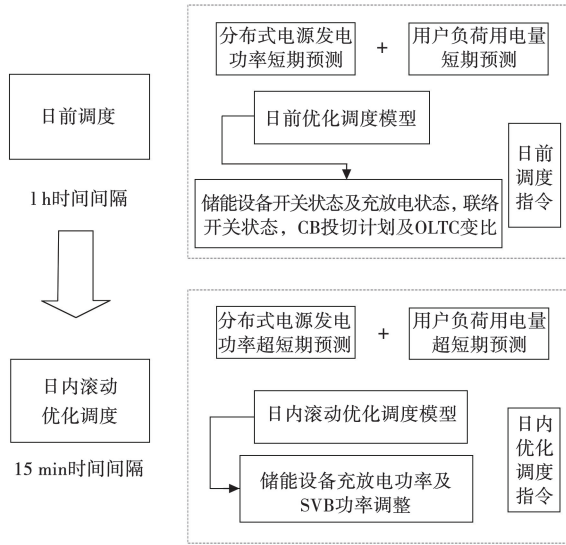


图 2 配电网日前-日内多时间尺度优化调度框架

Fig. 2 Day-ahead and intra-day multi-time scale optimal scheduling framework for distribution network

3.1 日前优化调度模型

为提高新能源消纳能力,减少经济成本,日前长时间尺度调度优化模型的目标函数以系统总运行成本最小为目标,因此目标函数如下所示:

$$\min C^{\text{day}} = C_{\text{loss}} + C_{\text{ess}} \quad (44)$$

其中日前长时间调度时间尺度为 1 h, 确定储

能的荷电状态,充放电状态,联络开关状态 CB 投组数以及 OLTC 变比,即: $\phi^{\text{day}} = [S_{i,t}^{\text{day}}, P_{i,t}^{\text{ess},c,\text{day}}, P_{i,t}^{\text{ess},d,\text{day}}, \sigma_{i,t}^{\text{c_day}}, \sigma_{i,t}^{\text{d_day}}, Q_{i,t}^{\text{cb_day}}, \sigma_{i,t}^{\text{swi_day}}, k_{ij}]$ 。

3.2 日内滚动优化调度模型

在一天中,以 15 min 为周期进行滚动优化,则有 96 个时段,根据 3 h 内的超短期负荷预测结果用于对日前计划进行调整。完成此过程后,进入下一循环阶段 $t = t + 1$,优化循环向后推进,更新预测信息并再次进行优化。该过程持续进行,直至 24 h 结束,这就是一天内的滚动优化。具体优化方式如图 3 所示。

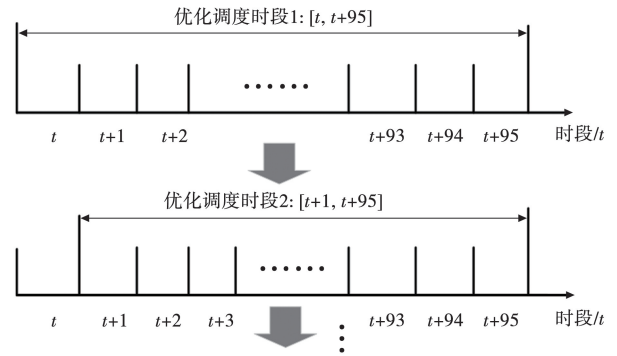


图 3 日内滚动优化方式

Fig. 3 Intra-day rolling optimization method

经过日前的滚动优化调度,储能装置的充电和放电状态是确定的。在一天中的日内优化时,只调节其特定的输出功率,而储能费用是固定的,所以目标函数,故目标函数中不考虑储能设备运行费用,计算如下所示:

$$\min C^{\text{day}_i} = C_{\text{loss}} + C_{\text{tr}} \quad (45)$$

日内滚动优化时段为 96 时段,每个 15 min 进行一次优化调度,分别对应日前 24 h,其中日前第 λ 时间段对应的出力功率调整计划为日内 $(4\lambda - 3) \sim 4\lambda$ 中 4 个时段的调整基准值,因此日内滚动优化调度的约束条件满足如下关系:

$$\begin{cases} S_{i,4\lambda-3}^{\text{day}_i} = S_{i,\lambda}^{\text{day}} \\ P_{i,4\lambda-4+t}^{\text{ess},c,\text{day}_i} = P_{i,\lambda}^{\text{ess},c,\text{day}} + \Delta P_{i,4\lambda-4+t}^{\text{ess},c,\text{day}} \\ P_{i,4\lambda-4+t}^{\text{ess},d,\text{day}_i} = P_{i,\lambda}^{\text{ess},d,\text{day}} + \Delta P_{i,4\lambda-4+t}^{\text{ess},d,\text{day}} \\ \sigma_{i,4\lambda-4+t}^{\text{c_day}_i} = \sigma_{i,\lambda}^{\text{c_day}} \\ \sigma_{i,4\lambda-4+t}^{\text{d_day}_i} = \sigma_{i,\lambda}^{\text{d_day}} \\ Q_{i,4\lambda-4+t}^{\text{cb_day}_i} = Q_{i,\lambda}^{\text{cb_day}} \\ \sigma_{i,4\lambda-4+t}^{\text{swi_day}_i} = \sigma_{i,\lambda}^{\text{swi_day}} \end{cases} \quad (46)$$

式中: λ, t 为整数变量, $\lambda \in [1, 24], t \in [1, 4]$, $\Delta P_{i,4\lambda-4+t}^{\text{ess},\text{c_day}}, \Delta P_{i,4\lambda-4+t}^{\text{ess},\text{d_day}}$ 分别为储能设备充放电功率调整值; $\max(\lambda)$ 为日内滚动优化调度时间段可取的最大值 λ 。

日内调度制定储能、SVC 出力功率, 即 $\phi_{\text{day},i} = [P_{i,t}^{\text{ess},\text{c_day}}, P_{i,t}^{\text{ess},\text{d_day}}, Q_{i,t}^{\text{SVC}}]$ 。

4 算例分析

4.1 算例系统描述

采用含风光储接入的改进的 IEEE-33 节点系统进行配电网多时间尺度变压器寿命优化策略有效性的验证, 测试系统结构如图 4 所示, 试验系统中的网络及线路参数参考文献[28], 系统最大负荷为 2 315 kW + 2 300 kvar, 节点电压标幺值为 0.95 ~ 1.05。文章的风电, 光伏出力及负荷大小 24 h 归一化曲线如图 5 所示, 在节点 9, 30 处接入储能设备, 在 17, 22 安装可投切电容器组, 在 25, 32 安装静态无功补偿装置; 储能设备充放电效率为 0.9, 额定容量为 300 kW h, 充放电功率最大值为 200 kW。其中 OLTC 高压变比为 $10 \pm 10 \times 5\%$, 低压为 0.4, 额定容量为 800 kVA, 环境温度取为 20℃, 且日切换次数上限为 3 次, 具体特性参数如表 1 所示。

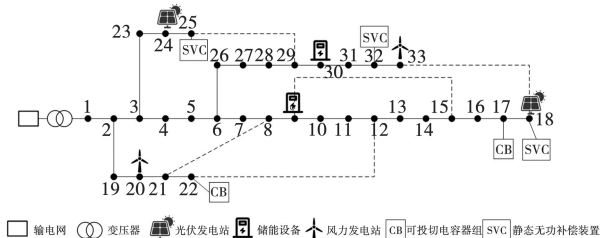


图 4 仿真测试系统结构

Fig. 4 Simulation test system structure

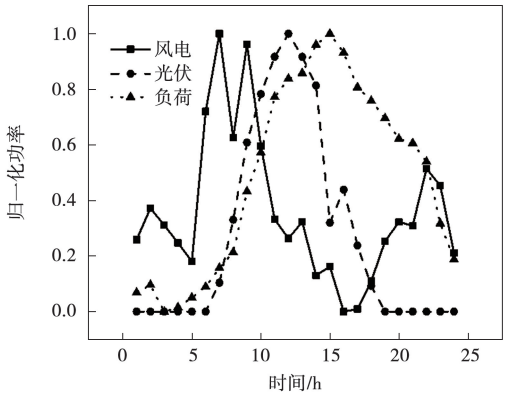


图 5 风-光-荷归一化功率分布曲线

Fig. 5 Normalized power distribution curves of wind, solar and load

表 1 有载调压变压器基础参数

Tab. 1 Basic parameters of on-load tap changer transformer

参数	取值
$\Delta\theta_{\text{or}}$	55
$\Delta\theta_{\text{hr}}$	23
τ_o	180
τ_w	4
x	0.8
y	1.6
k_{11}	1
k_{12}	1
k_{22}	2

算例采用 MATLAB R2023a 编程, 在 AMD Ryzen 5 5600 6CPU@3.50 GHz、32 GB RAM 硬件环境下仿真测试, 在 YALMIP 上建立了优化模型, 并基于 Gurobi 商用求解器进行了求解。

4.2 逆向过载时的日前日内多时间尺度变压器寿命优化分析

针对风光渗透率达 120% 的发生变压器逆向过载场景, 对比了两种传统方法, 对日前日内多时间尺度变压器寿命优化策略进行验证分析:

方法 1^[29]: 基于系统总运行成本最小化的多时间尺度配电网优化调度策略, 该策略未考虑变压器负载率对寿命损失的影响, 主要关注在保证供电可靠性的前提下, 降低系统整体运行费用;

方法 2^[30]: 未考虑配电网重构的变压器寿命优化策略, 其目标函数与文中方法一致, 仅通过对可控资源的协调调度调整负载率进而优化变压器寿命。

文中方法: 同时考虑配电网重构及负载率对变压器寿命损失影响的滚动优化策略, 通过对配电网结构进行适应性调整, 进一步优化变压器的运行状态和寿命。

图 6 展示了文中方法在日前优化与日内滚动优化前后的负载率变化情况。通过在日内滚动优化过程中最小化变压器损耗, 并结合储能设备及 SVC 出力功率的动态调整, 使得所提多时间尺度优化策略在日内调度周期(以 15 min 为时间间隔的 96 个调度时段)中, 实现变压器平均负载率下降约 25%。尤其在 10:00—13:00 新能源反送电高峰时段, 负载率降幅达 35%。图 7 进一步对比了不同变

压器寿命优化策略下的负载率优化效果,在日内 96 个时间断面中,文中选取 24 h 时间节点进行对比分析。结果表明,相较于方法 1 和方法 2,文中方法在降低负载率方面至少提升了 20%。尤其是由于引入了配电网重构模型,文中方法能够通过优化配电网运行模式,有效改善变压器的负载状态,从而进一步延长其使用寿命。

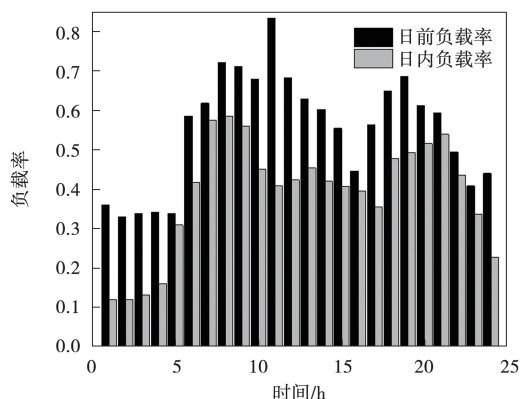


图 6 日前-日内负载率对比

Fig. 6 Day-ahead and intra-day load rate comparison

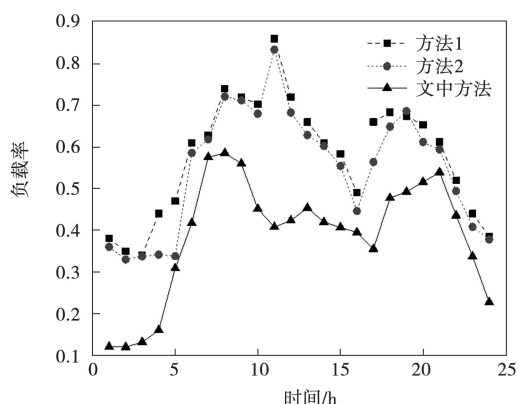


图 7 不同变压器寿命优化方法的负载率对比

Fig. 7 Loadrate comparison of different transformer life optimization methods

从图 8 可以明显看出,方法 1 和方法 2 虽在一定程度上降低了变压器寿命损失和热点温度,但因负载率优化不足,整体效果有限。相较之下,文中方法在优化时引入变压器负载率约束,以最小化变压器寿命损失成本为优化目标,并结合配电网重构策略,显著降低了变压器负载率,使热点温度下降约 10%,相对寿命损失减少 40% 以上。这充分表

明,所提变压器寿命优化策略在减少寿命损耗方面优势显著,可有效提升变压器长期运行的稳定性和可靠性。

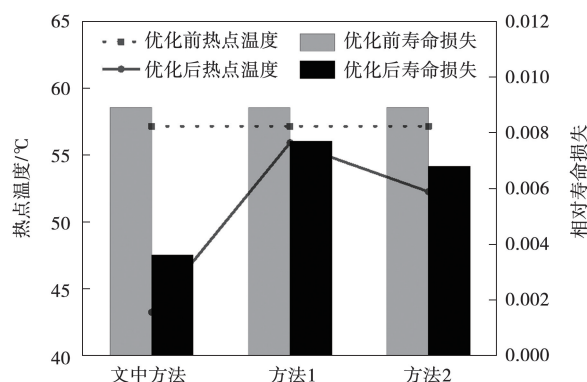


图 8 不同方法下寿命优化前后热点温度和寿命损失的比较

Fig. 8 Comparison of hot spot temperature and life loss before and after life optimization under different methods

4.3 协同优化调度分析与成本对比

在风光渗透率达到 120% 并引发变压器逆向过载的场景下,文中方法首先在日前优化阶段,根据分布式风光出力和典型负荷预测,求解日前优化调度模型。由于日前调度周期设定为 1 h,该阶段仅能初步确定储能的充放电指令。在日内优化阶段,以 15 h 为间隔,基于实时运行状态动态优化储能出力,从而有效降低变压器在逆向过载情况下的负载率。储能设备的具体调度结果如图 9、图 10 所示。

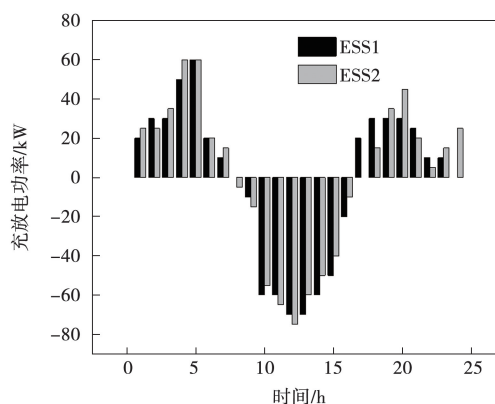


图 9 储能出力日前调度结果

Fig. 9 Energy storage output day-ahead scheduling results

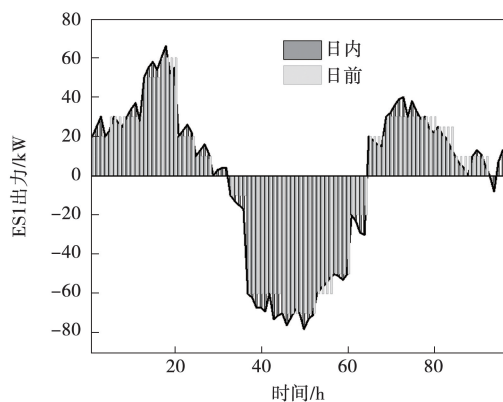


图 10 日前日内储能装置 ES1 调度结果
Fig. 10 ES1 scheduling results of day-ahead and intra-day energy storage device

如图 9 所示,在日内调度中,由于风光出力在 10:00—15:00 出力渗透率过高导致,潮流反向,使得变压器出现逆向过载,此时储能进行充电,消纳可再生能源出力,降低负载率,同时,储能设备在夜晚用电高峰期间,进行放电,在负荷需求高峰时放电,实现功率平衡,由于风光荷出力在短期预测中存在不确定性,在日内滚动优化调度过程中,出力进一步优化,使得消纳负载率更加精确,ES1 储能设别日前日内优化调度结果如图 10 所示。同时,日前优化 OLTC 变比如图 11 所示,通过协调控制 OLTC,动态调整系统的有功与无功功率分布,及时响应负荷和可再生能源的变化,减轻了逆向过载的压力,进一步优化了变压器的寿命。

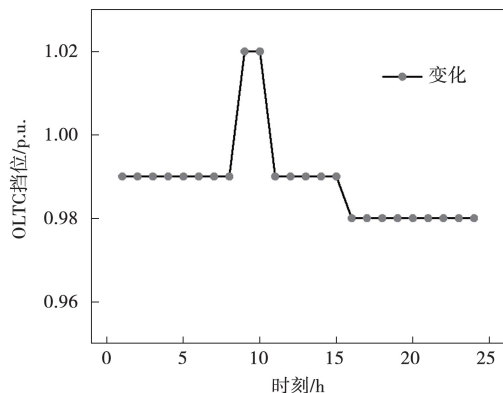


图 11 逆向过载下日前 OLTC 档位变化
Fig. 11 Change of day-ahead OLTC gear before reverse overload

在 10:00—15:00 期间,变压器潮流出现返送现象,并引发逆向过载问题。配网运行超负荷状况主要源于反向送电。而配网重构以及 CB、SVC 功率调节能够通过优化网络拓扑结构和调节无功功率

输出,有效降低负载率。其中,日前 CB 动作如图 12 所示,采取阶梯式容性无功补偿方式;日内 SVC 无功出力见图 13,可进行无功连续调节,以响应超短期波动。

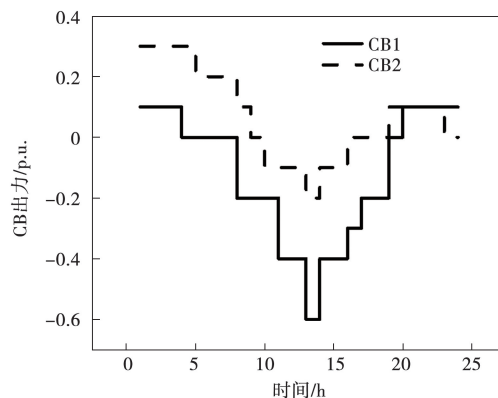


图 12 逆向过载下日前 CB 出力情况
Fig. 12 Day-ahead CB output under reverse overload

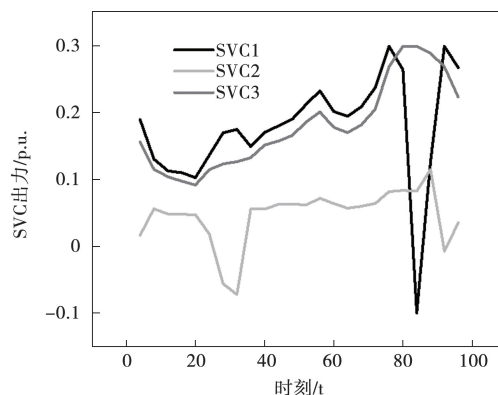


图 13 逆向过载下日内 SVC 出力情况
Fig. 13 Intra-day SVC output under reverse overload

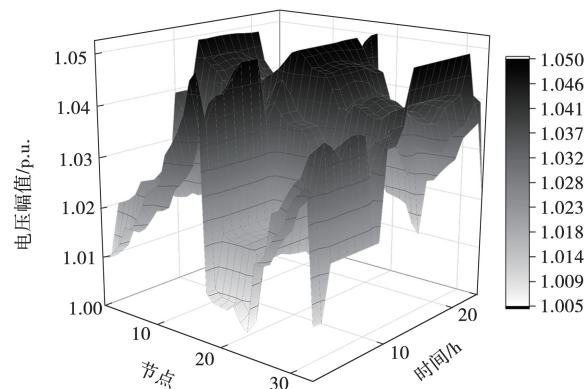


图 14 多时间尺度滚动优化后节点电压 3D 曲面图
Fig. 14 Node voltage 3D surface figure of multi-time scales after rolling optimization

从图 14 可以看出,利用日前与日内优化策略,

能够优化系统功率分布,使得配电网系统各节点电压标幺值稳定保持在 1.05 以下,从而确保电压稳定性。

其中,变压器逆向过载日前-日内滚动优化调度成本对比如表 2 所示。

表 2 不同方法优化调度成本对比
Tab. 2 Comparison of optimized scheduling cost of different methods

方法	$C/\text{元}$	$C_{\text{loss}}/\text{元}$	$C_{\text{ess}}/\text{元}$	$C_{\text{tr}}/\text{元}$
方法 1	828.57	637.13	83.21	98.23
方法 2	912.02	746.34	78.23	87.45
文中方法	818.15	678.35	69.43	70.47

从表 2 可以看出,文中方法相较于未考虑配电网重构的负载率优化方法(方法 2),在降低网损的同时,使系统总成本减少了 10%。虽然相较于方法 1,总成本未出现显著下降,但文中方法通过引入负载率对变压器寿命损失的影响,成功降低了 25% 的变压器寿命损失成本,在兼顾经济性的同时,实现了变压器寿命优化。此外,文中所提出的多时间尺度日前-日内滚动优化调度方法显著降低了储能运行成本,进一步提升了系统运行的综合效益。

5 结论

随着新型电力系统中风光等新能源接入配电网的比例逐步增加,“输-配”网间潮流方向频繁改变的现象愈加显著,导致变压器在反送时经常面临过载的情况,严重威胁变压器的运行寿命。针对这一问题,提出一种面向逆向过载的配电网变压器多时间尺度寿命优化策略。通过在改进的 IEEE-33 系统上进行测试,对比不同寿命优化方法在变压器逆向过载场景下的变压器寿命损失及成本,可以得出以下结论:

1) 变压器寿命损失与负载率成正比,通过调控储能设备、投切电容器组以及配网重构以改变拓扑结构,能够有效降低负载率,进而减缓变压器相对寿命损失,实现寿命优化。

2) 针对变压器逆向过载场景,由于可再生能源出力不确定性,通过日前-日内滚动优化调度策略,可实时消纳负载率以降低变压器损耗,在降低综合成本的同时,达到变压器逆向过载寿命优化效果。

参 考 文 献

[1] 吴若冰,张振超. 考虑新能源接入下的配电网线损综合检测方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 145-150.

Wu Ruobing, Zhang Zhenchao. Comprehensive line loss detection method for distribution networks considering new energy integration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 145-150.

[2] 张天明,王金丽,李运硕,等. 基于有载调容变压器和动态增容的光伏台区反向过载治理研究[J]. 电力信息与通信技术, 2025, 23(7): 90-100.

Zhang Tianming, Wang Jinli, Li Yunshuo, et al. Research on the governance of reverse overload in photovoltaic distribution transformer areas based on on-load capacity-regulating transformers and dynamic capacity increase[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2025, 23(7): 90-100.

[3] 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]. 电网技术, 2024, 48(8): 3515-3524.

Zhang Chen, Dong Xuzhu, Ruan Jiangjun, et al. Dynamic loading capacity evaluation method of oil-immersed power transformer for typical load curve[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3515-3524.

[4] 容春艳,程蓉,胡诗尧,等. 分裂绕组高阻抗电力变压器短路特性研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 104-113.

Rong Chunyan, Cheng Rong, Hu Shiyao, et al. Study on short-circuit characteristics of split-winding high-impedance power transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 104-113.

[5] 陈春,彭禹尧,曹一家,等. 数据驱动的台区配电变压器接头阻抗计算与温升预警方法电变器区配电变警方法[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 1-8.

Chen Chun, Peng Yuyao, Cao Yijia, et al. Data-driven method for impedance calculation and temperature rise warning of joint of distribution transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 1-8.

[6] Paulhiac L, Desquiers R. Dynamic thermal model for oil directed air forced power transformers with cooling stage representation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4135-4144.

[7] Ranjbar H, Saber H, Sharifzadeh M. Transactive charging control of electric vehicles considering voltage unbalance and transformers' loss of life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 2226-2235.

[8] 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 operation status monitoring method for primary side equipment in intelligent substations based on random forest[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(7): 184-190.
- [9] 刘刚, 兰和潼, 姜雄伟, 等. 基于温升特性的强迫导向油循环风冷结构变压器负荷能力评估[J]. *高电压技术*, 2024, 50(1): 232-241.
- Liu Gang, Lan Hetong, Jiang Xiongwei, et al. Load capacity evaluation of forced oil directed air cooling transformer based on temperature rise characteristics[J]. *High Voltage Technology*, 2024, 50(1): 232-241.
- [10] 张健, 胡玉耀, 宋士瞻, 等. 基于数值求解的油浸式变压器瞬态热点温度计算[J]. *高压电器*, 2023, 59(6): 103-110, 127.
- Zhang Jian, Hu Yuyao, Song Shizhan, et al. Calculation of transient hotspot temperature of oil-immersed transformer based on numerical solution[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(6): 103-110, 127.
- [11] 唐文虎, 张银, 钱瞳. 考虑配电网重构和楼宇群主动需求响应的集成楼宇群配电网优化控制[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(8): 2966-2979.
- Tang Wenhui, Zhang Yin, Qian Tong. Optimal control of integrated building cluster distribution network considering distribution network reconfiguration and active demand response of building clusters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(8): 2966-2979.
- [12] 陈朋, 李军, 王新刚, 等. 含分布式电源的10kV配电变压器升压运行特性分析[J]. *变压器*, 2023, 60(5): 62-67.
- Chen Peng, Li Jun, Wang Xingang, et al. Analysis of boost operation characteristics of 10 kV distribution transformer with distributed generation[J]. *Transformer*, 2023, 60(5): 62-67.
- [13] 陈佳琦, 胡俊杰, 马文帅. 计及变压器寿命的电动汽车分布式控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(4): 92-100.
- Chen Jiaqi, Hu Junjie, Ma Wenshuai. Distributed control strategy for electric vehicles considering transformer life[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(4): 92-100.
- [14] Pravakar P, Iftekhar A, Daryoush H, et al. Optimal sizing of energy storage system to reduce impacts of transportation electrification on power distribution transformers integrated with photovoltaic[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 144687-144698.
- [15] 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 of in-service low-voltage distribution transformers based on distribution network reconfiguration[J]. *Shanxi Electric Power*, 2016, 44(3): 38-42, 92.
- [16] 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.
- [17] 黎家明, 霍群海, 尹靖元, 等. 考虑柔性有载调压变压器的两阶段电压无功优化协调控制方法研究[J]. *电网技术*, 2025, 49(1): 272-283.
- Li Jiaming, Huo Qunhai, Yin Jingyuan, et al. Research on two-stage voltage and reactive power coordinated optimization control method considering flexible on-load tap-changing transformer[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(1): 272-283.
- [18] 宁柏锋, 田松林. 多时间尺度下主动配电网能量调度优化[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(6): 93-99.
- Ning Baifeng, Tian Songlin. Energy scheduling optimization of active distribution network across multiple time scales[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(6): 93-99.
- [19] 赵飞龙, 咸日常, 荣庆玉, 等. 三相不平衡工况下配电变压器温升特性及绝缘损失分析[J]. *高电压技术*, 2023, 49(10): 4364-4372.
- Zhao Feilong, Xian Richang, Rong Qingyu, et al. Analysis of temperature rise characteristics and insulation loss of distribution transformers under three-phase unbalance condition[J]. *High Voltage Technology*, 2023, 49(10): 4364-4372.
- [20] 魏承志, 李俊豪, 涂春鸣, 等. 计及变压器与SOP损耗特性的柔性互联配电网优化调控策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 69-78.
- Wei Chengzhi, Li Junhao, Tu Chunming, et al. Optimal control strategy of flexible interconnected distribution network considering transformer and sop loss characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 69-78.
- [21] 赵玉顺, 卫龙, 戴义贤, 等. 基于流固耦合的环氧绝缘电力电子变压器温度分布研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(12): 75-84.
- Zhao Yushun, Wei Long, Dai Yixian, et al. Study on temperature distribution of epoxy insulated power electronic transformer based on fluid-solid-structure coupling[J].

- High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 75-84.
- [22] 曾飞, 苏伟, 徐广开, 等. 含快充负荷的低压直流互联配电网多时间尺度经济调度[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 14-23.
- Zeng Fei, Su Wei, Xu Guangkai, et al. Multi-time scale economic dispatch of low voltage DC Interconnected distribution network with fast charging load[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 14-23.
- [23] 苏浩益, 李昱萱, 高卫国, 等. 基于耦合对称交互熵理论的集散式储能方案优选[J]. 广东电力, 2025, 38(10): 50-57.
- Su Haoyi, Li Yuxuan, Gao Weiguo, et al. Optimization of the distributed energy storage scheme based on the coupling symmetric cross entropy theory[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(10): 50-57.
- [24] 赵晶晶, 朱炯达, 刘帅, 等. 基于集群划分的配电网多时间尺度分布式有功-无功协同优化方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 57-66.
- Zhao Jingjing, Zhu Jiongda, Liu Shuai, et al. Multi-time scale distributed active-reactive power cooperative optimization method for distribution network based on cluster partitioning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 57-66.
- [25] 吴任博, 黄奕俊. 高比例可再生能源接入下含自愈性能的分布式配电网重构策略研究[J]. 发电技术, 2024, 45(5): 975-982.
- Wu Renbo, Huang Yijun. Research on reconfiguration strategy of distributed distribution network with self-healing performance under high-proportion renewable energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(5): 975-982.
- [26] 郑罡, 南钰, 孟凡斌, 等. 计及储能装置与配网重构的主动配电网分层优化调度[J]. 高压电器, 2025, 61(5): 53-63.
- Zheng Gang, Nan Yu, Meng Fanbin, et al. Hierarchical optimal schedule for active distribution network considering energy storage system and distribution network reconfiguration[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 53-63.
- [27] 廖斌, 冯春林, 陈松, 等. 一起 35kV 干式空心串联电抗器故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 63-70.
- Liao Bin, Feng Chunlin, Chen Song, et al. Fault analysis of a 35kV dry type air-core series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 63-70.
- [28] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [29] 唐杰, 吕林, 叶勇, 等. 多时间尺度下主动配电网源-储-荷协调经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 53-64.
- Tang Jie, Lü Lin, Ye Yong, et al. Coordinated economic dispatch of source-storage-load in active distribution network under multiple time scales[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 53-64.
- [30] Chen S, Wang C, Zhang Z. Multitime scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network considering multiple correlation of renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6): 5614-5625.
-
- 收稿日期: 2025-04-10; 修回日期: 2025-10-27
- 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
- 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
- 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
- 朱庆东(1987—),男,博士,高级工程师,研究方向为变压器设备状态检测及故障诊断。E-mail:zqd.521@stu.xjtu.edu.cn
- 吉佳旺(2001—),男,硕士研究生,研究方向为配电网储能系统优化配置,优化运行。E-mail:Jjw_1227@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
- (编辑 杜景飞)