引用格式:宋竹萌,王宝,贾健雄,等.面向新能源消纳和季节性负荷供应的农村配电网联合调控策略[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):77-89.
Citation: SONG Zhumeng, WANG Bao, JIA Jianxiong, et al. Joint regulation strategy of rural distribution networks for renewable energy accommodation and seasonal load supply[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):77-89.

面向新能源消纳和季节性负荷供应的农村配电网联合调控策略

宋竹萌[1],王　宝[1],贾健雄[1],伍　飞[2],张　理[1],张程嘉[3],杨晓东[3]
(1.国网安徽省电力有限公司经济技术研究院,安徽 合肥 230022;2.国网安徽省电力有限公司,安徽 合肥 230061;
3.合肥工业大学电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009)

摘　要:针对电动汽车和新能源发电广泛接入的农村配电网中新能源消纳和季节性负荷供应存在压力的问题,提出一种利用智能软开关,并采用将变压器柔性互联、电动汽车的有序充电、变压器合理经济扩容这3种方法相互协调配合的联合调控策略,在满足新能源配电网的季节性负荷需要的同时,提高新能源消纳能力。首先,分析新能源背景下的农村地区不同台区变压器使用情况及其负荷特点;其次,建立电动汽车有序充电模型、变压器容量评估体系模型和协同调控运行模型;再次,采用凸松弛和线性化方法,将构建的非线性优化模型转换为二阶锥规划模型;最后,利用改进的33节点配电网开展仿真试验,验证本文所提调控策略的实际合理性与有效性。研究结果表明,所提策略可以有效提升农村地区变压器利用率,提升变压器容量不足时的新能源消纳能力和季节性负荷供应能力。

关　键　词:智能软开关;新能源消纳;季节性负荷;有序充电;容量互济;柔性互联
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.008　　**中图分类号**:TM727　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0077-13

Joint regulation strategy of rural distribution networks for renewable energy accommodation and seasonal load supply

SONG Zhumeng[1], WANG Bao[1], JIA Jianxiong[1], WU Fei[2],
ZHANG Li[1], ZHANG Chengjia[3], YANG Xiaodong[3]
(1. Economic and Technology Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China;
2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In view of the problems of new energy accommodation and seasonal load supply pressure in a rural distribution network with extensive access to electric vehicles and new energy power generation, a joint regulation strategy is proposed which utilizes soft open points to achieve coordinated cooperation of flexible interconnection of transformers, orderly charging of electric vehicles, and rational economic expansion of transformer capacity, thereby ensuring seasonal load demand in renewable energy distribution networks while enhancing renewable energy accommodation capacity. Firstly, the usage and load characteristics of different transformer districts in rural areas under the background of renewable energy are analyzed. Secondly, the orderly charging model of electric vehicles, the transformer capacity evaluation system model, and the cooperative regulation operation model are established. Thirdly, the constructed nonlinear optimization model is transformed into a second-order cone programming model through convex relaxation and linearization methods. Finally, simulation experiments are carried out by using the improved 33-

收稿日期:2024-007-31;**修回日期**:2025-03-12
基金项目:国网安徽省电力有限公司企业研究类项目(B6120924000U)
通信作者:张程嘉(2001—),男,博士,主要从事双极直流配电网运行优化和交直流混合配电网优化等方面的研究;E-mail:zhangcj106@163.com

node distribution network, which confirms the practical rationality and effectiveness of the regulation strategy proposed in this paper. The research findings demonstrate that the proposed strategy can effectively improve the transformer utilization rate in rural areas and enhance the renewable energy accommodation capacity, as well as the seasonal load supply capacity when transformer capacity is insufficient.

Key words: soft open point; renewable energy accommodation; seasonal load; orderly charging; capacity complementarity; flexible interconnection

近些年来,中国农村地区的用电规模和分布式光伏接入规模不断扩大。这些农村地区的新能源配电网变压器容量有限,在季节性负荷高峰和新能源发电高峰时段,其新能源消纳和季节性负荷供应压力问题尤为突出[1-2]。因此,农村地区变压器须进行扩容。但盲目扩容可能会出现负载率低[3]、经济性差等问题。伴随着电动汽车(electric vehicle, EV)产业的快速发展,电动汽车渗透率不断提高。利用智能软开关(soft open point, SOP)的快速响应特性[4-7],可将中国农村地区的不同负荷特性的变压器互联[8],准确、连续地调节所连接馈线的有功、无功功率。当季节性负荷增大时,中国农村地区还可借助以EV为负荷主体的变压器,调控临近配变容量[9],降低这些地区临近配变扩容的投资成本。

与此同时,在充电负荷高峰时段,以EV充电桩为主要负荷的变压器可考虑借用农村地区负荷低谷时的配变冗余容量,在保证配电网安全、稳定运行的前提下,进行电动汽车充、换电站变压器的扩容[10],降低投资成本。

在变压器容量互济方面,文献[8]提出了一种充电站运营商、变压器用户、车主三方博弈的互济模式,并建立了调节效果的评价指标体系和联合调节难度量化模型。文献[11-12]建立了一种考虑区域电网互济的联合规划模型,大幅提高了全网新能源消纳能力,为广域电网提供了新互联方案。文献[13]提出了一种基于时变电价的,可实现负荷在时间和空间上转移的方法,该方法以EV的有序充电为基础,将EV充电桩作为主要负荷的变压器冗余容量的利用对象。但该方法仅适应距离较近的2个变压器之间的容量互济。

在功率调控机制研究方面,文献[14]利用深度强化学习和连续动作空间的安全校正控制,有效地降低了线路潮流功率。文献[15]针对高比例光伏接入配电网所导致的更复杂的潮流分布问题,分析了不同光伏接入位置对于潮流的影响和过载风险情况,提出了一种多层级重过载风险评估方法,对配电网潮流优化和功率调控有重要的参考意义。文献[16-17]提出了使用多端背靠背柔性互联系统进行负载均衡的方法,通过多目标优化,实现电网多馈线的负载均衡,在保证馈线的容量裕度的同时,提升了新能源的安全消纳能力,保证了电网运行的可靠性和高效。文献[18-19]针对电网不同运行方式下协调性之间的差异,分析电网负载均衡度,提出了一种在不同运行方式下的源-网-荷协调控制方法,取得了较好的效果。

在EV不同充电模式对配电网和变压器容量的影响方面,也涌现了很多研究。由于无序充电具有时间和空间上的双重不确定性[20],EV的无序充电会给配电网和变压器容量带来一系列问题。文献[21]指出,EV无序充电会导致变压器更快、更易出现过载。文献[22]指出,无序充电会加剧配电网负荷端的波动。文献[23]提出了充分利用EV电池的储能属性减少EV充电负荷对配网的影响的方法,并分析了其调控机制和激励机制。文献[24]指出,相较于EV无序充电,EV有序充电能更好地缩小负荷峰谷差、降低网损。EV有序充电更有利于充电站进行变压器扩容的评估,避免变压器经常处于负载率较低的状态。

这些研究均在不同程度上改善了变压器容量互济和功率过载问题,但对可调负荷资源较少的中国农村地区,如何通过变压器互联,增强消纳和供应能力与远距离变压器之间的互济问题的研究仍鲜见。为此,本文考虑利用智能软开关实现不同负荷属性变压器的柔性互联[8],在尽量缩减变压器扩容容量的情况下,实现新能源的充分消纳和保证季节性负荷的供应,并利用EV的有序充电调控负荷,提高中国农村地区对于新能源的消纳能力,尽可能减少该地弃风、弃光现象的发生。

1 农村地区新能源配电网低压柔性互联调控策略

1.1 特征与问题描述

中国农村地区通常地理位置偏远、分布分散,

且处于配电网的末端。中国农村地区在未接入大量分布式光伏且没有大量季节性负荷时，其地区配变的使用容量较小，当地变压器容量一般仅能满足其运行需求，其变压器平均负载率也普遍较低。随着中国新型电力系统和新型能源体系的不断建设和发展，这些地区也建起了更多的充、换电站。中国农村地区新能源配电网主要呈现以下 3 个特点：

1）季节性负荷波动大，电网利用率低[25]。夏冬季节性大负荷设备（如空调、取暖设备、农业灌溉设备等）集中使用，变压器容量需求激增[8]；春秋季负载率较低，电网功率峰谷差增大，导致设备利用率和供电经济性显著下降。

2）分布式光伏大规模接入导致功率倒送。农村地区的大规模屋顶光伏在接入配电网后，该地无法全额消纳的发电量会造成功率倒送，从而导致变压器过载[26]。

3）日间与夜间的负荷波动问题。在午间，光伏发电倒送，变压器出现容量反向不足；在晚间，电网负荷增长，容量正向不足，进一步加剧了新能源消纳率[27]和负荷满足率低的问题。这些都亟待有效的解决方案。

1.2　低压柔性互联调控方案

随着新能源电动汽车的快速发展，中国农村地区建起了更多的充、换电站。这些充、换电站均存在一定的冗余容量，但其年平均负载率普遍较低，因此，可利用中国农村地区以 EV 为主要负荷的充、换电站变压器冗余容量来解决当地配电网的新能源消纳和供应问题。

两个互联的变压器可借助彼此冗余容量来解决各自容量不充足的问题，提高设备的利用率，实现变压器的容量互济。配电网的互联允许多个变压器共享备用容量，这使得每个变压器的预留裕度相较于其独自运行时的预留裕度显著减小。但为保障变压器运行的安全性，应对极端情况，即使实现变压器互联，也应在设计中为每个变压器设定最低安全裕度。综上所述，变压器在大部分时间段保留一定量的综合裕度即可。综合裕度过载率是变压器所使用的容量大于变压器额定容量 90% 的时间段占总时长的比例。其计算式为

$$\delta=\frac{C\left(\frac{S_{b1}+S_{b2}}{S_{e1}+S_{e2}}\geqslant 0.9\right)}{N} \tag{1}$$

式中，δ 为变压器互联后的综合裕度；S_{b1}、S_{b2} 分别为变压器 1、2 的所需容量；S_{e1}、S_{e2} 分别为变压器 1、2 的额定容量；$C(\cdot)$ 为满足括号内条件的时段数量；N 为时间段的总数。

此时的变压器所预留的裕度不多，但变压器均未过载运行，不会对变压器安全带来影响。一般情况下，认为此数值 $\delta<30\%$ 即可。

在 SOP 和有序充电的调控下，如变压器的裕度得不到保证，可选择对变压器进行扩容以确保配电网的安全性和稳定性。变压器扩容、SOP、电动汽车有序充电这三者相互配合，共同组成了本文的中国农村地区新能源消纳和季节性负荷供应的调控策略。

1.3　柔性互联分析

SOP 不存在动作次数的约束，故其可在较低运行成本条件下，实现对配电网的有功与无功功率的精准调节[6,28]。本文以背靠背拓扑结构的 SOP 为研究对象，其拓扑结构如图 1 所示。在图 1 中，C_{dc} 为直流侧电容，U_{dc} 为直流侧电压。从图 1 中可以看出，SOP 为完全对称的结构，且这 2 个变流器共用直流侧电容。

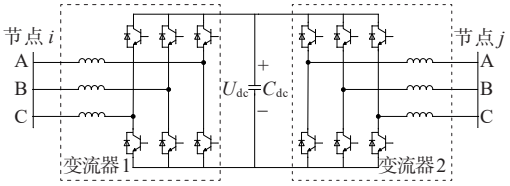


图 1　SOP 拓扑结构

Figure 1　Topology structure of SOP

对于 B2B-VSC 型 SOP 装置，其优化变量为变流器的有功、无功功率。其直流侧电容须确保两侧有功功率保持平衡；其无功功率则因直流侧的隔离而互不影响，仅须满足变流器的容量约束[5]。变流器在运行时会产生一定的损耗，故建模应考虑增加 SOP 的损耗部分。以 SOP 向节点注入功率的方向为正方向，得到运行约束：

$$P_{t,i}^{\mathrm{SOP}}+P_{t,j}^{\mathrm{SOP}}+P_{t,i}^{\mathrm{SOP,loss}}+P_{t,j}^{\mathrm{SOP,loss}}=0 \tag{2}$$

$$P_{t,i}^{\mathrm{SOP,loss}}=A_i^{\mathrm{SOP}}\sqrt{\left(P_{t,i}^{\mathrm{SOP}}\right)^2+\left(Q_{t,j}^{\mathrm{SOP}}\right)^2} \tag{3}$$

$$P_{t,j}^{\mathrm{SOP,loss}}=A_j^{\mathrm{SOP}}\sqrt{\left(P_{t,j}^{\mathrm{SOP}}\right)^2+\left(Q_{t,j}^{\mathrm{SOP}}\right)^2} \tag{4}$$

式中，$P_{t,i}^{\mathrm{SOP}}$、$Q_{t,i}^{\mathrm{SOP}}$ 分别为 SOP 在 t 时刻注入节点 i 的有功功率和无功功率；$P_{t,j}^{\mathrm{SOP,loss}}$ 为在 t 时刻与节点 i 相连的变流器运行时产生的损耗；A_i^{SOP} 为与节点 i 相连的变流器的损耗系数。

除须满足有功功率平衡约束外，SOP 两侧变流

器输出的有功功率和无功功率还应满足SOP的容量限制，即

$$\sqrt{\left(P_{t,i}^{\mathrm{SOP}}\right)^2+\left(Q_{t,i}^{\mathrm{SOP}}\right)^2}\leqslant S_i^{\mathrm{SOP}} \tag{5}$$

$$\sqrt{\left(P_{t,j}^{\mathrm{SOP}}\right)^2+\left(Q_{t,j}^{\mathrm{SOP}}\right)^2}\leqslant S_j^{\mathrm{SOP}} \tag{6}$$

式中，S_i^{SOP}、S_j^{SOP}分别为与节点i、j相连的变流器的容量。

2 面向新能源消纳和季节性负荷供应的调控策略

2.1 电动汽车充电管控

本文考虑的是服务不同类型的本地区通勤EV和其他车辆的多类型EV充电桩。EV充电桩是一种实现车网互动的商业模式，其核心是将EV作为分布式储能装置，通过有序引导来管理其充、放电过程[29-32]。

EV用户可自主决定是否参与该模式。用户启动充电时，充电设备会提供两种选项：参与运营商车网互动（vehicle to grid，V2G）服务，享受更优惠电价；自主充放电，按常规电价计费。若用户选择前者，仅须输入离开时间与所需充电量，运营商便会启动充、放电服务，如确定在用户设定的截止时间前完成目标充电量，就给予电费优惠。

本文考虑的充电站位于中国农村居住区。该地大部分通勤车辆用户都是晚上下班后将车辆接入充电桩，在次日早上用车前，EV会一直与充电桩相连接[33]。通常，这些用户对EV充电速度要求不高，为获得更优惠的电价，用户普遍会采用慢充桩进行有序充电。

为充分满足各种EV的充电需求，本文设置了4种充电模式。

1）模式1：采用快充桩进行有序充电。

2）模式2：采用慢充桩进行有序充电。

3）模式3：采用快充桩进行无序充电。

4）模式4：采用慢充桩进行无序充电。

2.1.1 有序充电模型

此类通勤EV车辆采用有序充电，只有时间维度的能量传输，为保证候选解的正常运行，每个候选解都应满足约束条件：

$$\begin{cases}0\leqslant c_{t,i}^{\mathrm{ev}}\leqslant u_{t,i}^{\mathrm{ev}}c_i^{\mathrm{fc}}\\0\leqslant d_{t,i}^{\mathrm{ev}}\leqslant(1-u_{t,i}^{\mathrm{ev}})d_i^{\mathrm{fc}}\end{cases},\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O,fc}},\forall t\in\left[T_i^{\mathrm{in}},T_i^{\mathrm{out}}\right] \tag{7}$$

$$\begin{cases}0\leqslant c_{t,i}^{\mathrm{ev}}\leqslant u_{t,i}^{\mathrm{ev}}c_i^{\mathrm{sc}}\\0\leqslant d_{t,i}^{\mathrm{ev}}\leqslant(1-u_{t,i}^{\mathrm{ev}})d_i^{\mathrm{sc}}\end{cases},\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O,sc}},\forall t\in\left[T_i^{\mathrm{in}},T_i^{\mathrm{out}}\right] \tag{8}$$

$$S_{t,i}=S_{t-1,i}+\frac{\eta^{\mathrm{c}}c_{t,i}^{\mathrm{ev}}-d_{t,i}^{\mathrm{ev}}/\eta^{\mathrm{d}}}{A_i}\Delta t,\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O}} \tag{9}$$

$$S_i^{\min}\leqslant S_{t,i}\leqslant S_i^{\max},\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O}} \tag{10}$$

$$S_i^{\mathrm{ini}}+\frac{\sum_{t\in\mathcal{T}}(\eta^{\mathrm{c}}c_{t,i}^{\mathrm{ev}}-d_{t,i}^{\mathrm{ev}}/\eta^{\mathrm{d}})\Delta t}{A_i}\geqslant S_i^{\mathrm{E}},\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O}} \tag{11}$$

式中，$c_{t,i}^{\mathrm{ev}}$和$d_{t,i}^{\mathrm{ev}}$分别为第i辆EV的充电与放电功率；T_i^{in}、T_i^{out}分别为第i辆EV与充电设备的连接时间和断开时间；$S_{t,i}$为第t时刻第i辆EV的荷电状态（state of charge，SOC）；η^{c}和η^{d}均为功率交换效率；Δt为时间增量；A_i为第i辆EV的电池容量；c_i^{fc}和d_i^{fc}分别为第i辆快充EV的最大充、放电功率；c_i^{sc}和d_i^{sc}为第i辆慢充EV的最大充、放电功率；$S_i^{\min}$和$S_i^{\max}$分别为第i辆EV的荷电状态下与上限；S_i^{ini}和S_i^{E}分别为第i辆EV的初始荷电状态和期望荷电状态；$u_{t,i}^{\mathrm{ev}}$为表示第i辆EV在t时刻的充、放电状态的0-1变量（若其值为0，则EV正在放电；若其值为1，则EV正在充电）；$\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O}}$为采用有序充电模型的EV集合；$\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O,fc}}$和$\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O,sc}}$分别为采用有序充电模型进行快充和慢充的EV集合；

除满足约束（7）～（11）外，这类EV的初始与预期SOC也应满足以下2个约束条件：

$$S_i^{\mathrm{ini}}=S_i^{\mathrm{D}}-l_i\rho_i/A_i,\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O}} \tag{12}$$

$$S_i^{\mathrm{E}}\geqslant S_i^{\min}+l_i\rho_i/A_i,\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O}} \tag{13}$$

式中，S_i^{D}为第i辆EV离开充电站时的荷电状态；l_i为EV从离开前一个充电站到到达当前充电站的行驶距离；ρ_i为能量消耗率。

2.1.2 无序充电模型

此类EV车辆是乡镇地区的网约车或临时充电的EV车辆，其常采用无序充电，其目的是快速将EV充电至期望的荷电状态。根据用户使用习惯，此类EV车辆通常在中午或者下午进行充电，即

$$\begin{cases}c_{t,i}^{\mathrm{ev}}=c_i^{\mathrm{fc}},\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{C,fc}},\quad\forall t\in\left[T_i^{\mathrm{in}},T_i^{\mathrm{out}}\right]\\c_{t,i}^{\mathrm{ev}}=c_i^{\mathrm{sc}},\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{C,sc}},\quad\forall t\in\left[T_i^{\mathrm{in}},T_i^{\mathrm{out}}\right]\end{cases} \tag{14}$$

$$d_{t,i}^{\mathrm{ev}}=0,\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{C}},\forall t\in\left[T_i^{\mathrm{in}},T_i^{\mathrm{out}}\right] \tag{15}$$

式中，$\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{C}}$为采用无序充电模型的EV集合；$\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{C,fc}}$和$\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{O,sc}}$分别为采用无序充电模型进行快充和慢充的EV集合。

此类EV用户常会在电池的荷电状态较低时选择充电。除约束式（14）、（15）外，这类EV还应满足以下约束：

$$T_{i,N}^{\mathrm{in}}=T_{i,N-1}^{\mathrm{out}}+A_i(S_i^{\mathrm{D}}-S_i^{\mathrm{ini}})/V_i\ \rho_i,\forall i\in\Omega_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{C}} \tag{16}$$

式中，V_i为第i辆EV从离开前一个充电站到到达当前充电站的平均行驶速度；$T_{i,N}^{\mathrm{in}}$为第i辆EV与充电设备的连接时间；$T_{i,N-1}^{\mathrm{out}}$为第i辆EV上一次充电至

期望值的时刻。

2.2　协同运行调控建模

2.2.1　目标函数

当配电网正常运行时，SOP 主要通过调节配电网功率分布来降低配电网损耗；若配电网电压超出允许运行范围，SOP 则通过电压无功控制来优化配电网电压水平。本文将总运行成本与电压偏差的线性加权组合作为优化目标函数，并考虑潮流约束、配电网安全约束、电压稳定约束、可调资源的有功与无功约束。同时，对 EV 充电桩，考虑有序充电和无序充电的功率约束、容量约束，建立柔性配电网的协同运行调控模型。该目标函数 f[33] 为

$$\min f = \alpha_1\left(f_{\text{loss}} + f_{\text{switch}} + f_{\text{ev}}\right) + \alpha_2 f_{\text{v}} \tag{17}$$

式中，α_1、α_2 均为权重系数，其可通过层次分析法来确定[32]；f_{loss}、f_{switch}、f_{ev} 分别为功率损耗、变压器切换操作成本和电动汽车充、放电损耗成本；f_{V} 为电压偏差程度。

1）运行成本。

在通常情况下，配电网运行的经济性是首要目标。配电网运行成本为

$$\begin{cases} f_{\text{loss}} = C_{\text{loss}}\left(\sum\limits_{t=1}^{N_{\text{T}}}\sum\limits_{m_{ij}\in\Omega_{\text{B}}} r_{ij} I_{t,ij}^2 \Delta t + \sum\limits_{t=1}^{N_{\text{T}}}\sum\limits_{i=1}^{N_{\text{N}}} P_{t,i}^{\text{SOP,loss}} \Delta t\right) \\ f_{\text{switch}} = \sum\limits_{t=1}^{N_{\text{T}}}\sum\limits_{j\in\Omega_{\text{O}}}\left(C_{\text{tap}}\left|K_{t,ij} - K_{t-1,ij}\right|\right) \\ f_{\text{ev}} = \sum\limits_{t=1}^{N_{\text{T}}}\sum\limits_{i=1}^{N_{\text{E}}} C_{\text{e}}\left(c_{t,i}^{\text{ev}}\eta^{\text{c}} + c_{t,i}^{\text{ev}}/\eta^{\text{d}}\right)\Delta t \end{cases} \tag{18}$$

式中，N_{T} 为时间段总数；N_{N} 为配电网节点总数；N_{E} 为 EV 充电桩总数；$P_{t,i}^{\text{SOP,loss}}$ 为 SOP 功率损耗；Ω_{B} 为配电网支路集合；$K_{t,ij}$ 为 t 时刻线路 m_{ij} 变压器所处的档位；Ω_{O} 为配电网变压器支路集合；C_{loss} 为与配电网损耗有关的成本系数；C_{tap} 为与变压器切换操作有关的成本系数；C_{e} 为与 EV 充、放电损耗有关的成本系数；r_{ij} 为线路 m_{ij} 的电阻；$I_{t,ij}$ 为 t 时刻线路 m_{ij} 上传输的电流，其方向为从节点 i 流向节点 j；m_{ij} 为集合 Ω_{B} 中的节点 i、j 间的线路。

2）电压偏差。

电压偏差程度 f_V 为

$$f_{\text{V}} = \sum_{t=1}^{N_{\text{T}}}\sum_{i=1}^{N_{\text{N}}}\left|U_{t,i}^2 - \tilde{U}^2\right|\left\{\left(U_{t,i} \geqslant U_{\max} \| U_{t,i} \leqslant U_{\min}\right)\right\} \tag{19}$$

式中，$\tilde{U}$ 为配电网额定电压；$U_{t,i}$ 为 t 时刻节点 i 的电压；$U_{\max}$、$U_{\min}$ 分别为电压优化区间的上、下限。

当电压幅值处于优化区间 $[U_{\min}, U_{\max}]$ 时，该目标函数仅以降低网损为核心；若电压幅值超出这一优化区间，该目标函数则包括降低配电网网损与减小电压偏差。

2.2.2　约束条件

1）交流配电网潮流约束[31]。

该约束式为

$$\sum_{m_{ji}\in\Omega_{\text{B}}}\left(P_{t,ij} - r_{ij} I_{t,ij}^2\right) + P_{t,i} = \sum_{m_{ik}\in\Omega_{\text{B}}} P_{t,ik} \tag{20}$$

$$\sum_{m_{ji}\in\Omega_{\text{B}}}\left(Q_{t,ij} - x_{ij} I_{t,ij}^2\right) + Q_{t,i} = \sum_{m_{ik}\in\Omega_{\text{B}}} Q_{t,ik} \tag{21}$$

$$U_{t,i}^2 - U_{t,j}^2 - 2\left(r_{ij} P_{t,ij} + x_{ij} Q_{t,ij}\right) + \left(r_{ij}^2 + x_{ij}^2\right) I_{t,ij}^2 = 0 \tag{22}$$

$$I_{t,ij}^2 U_{t,i}^2 = P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2 \tag{23}$$

$$P_{t,i} = P_{t,i}^{\text{DG}} + P_{t,i}^{\text{SOP}} - P_{t,i}^{\text{SL}} \tag{24}$$

$$Q_{t,i} = Q_{t,i}^{\text{DG}} + Q_{t,i}^{\text{SOP}} - Q_{t,i}^{\text{SL}} \tag{25}$$

式中，$P_{t,ij}$ 和 $Q_{t,ij}$ 分别为 t 时刻线路 m_{ij} 上传输的有功和无功功率，其方向均为从节点 i 流向节点 j；x_{ij} 为线路 m_{ij} 的电抗；$P_{t,i}$ 和 $Q_{t,i}$ 分别为 t 时刻节点 i 的注入有功和无功功率；$P_{t,i}^{\text{DG}}$、$Q_{t,i}^{\text{DG}}$ 分别为 t 时刻节点 i 处电源输出的有功和无功功率；$P_{t,i}^{\text{SOP}}$ 和 $Q_{t,i}^{\text{SOP}}$ 分别为 t 时刻 SOP 向节点 t 注入的有功和无功功率；$P_{t,i}^{\text{SL}}$ 和 $Q_{t,i}^{\text{SL}}$ 分别为 t 时刻节点 i 处季节性负荷消耗的有功和无功功率。

2）配电网安全约束。

该约束式为

$$\left(\underline{U}\right)^2 \leqslant U_{t,i}^2 \leqslant \left(\overline{U}\right)^2 \tag{26}$$

$$I_{t,ij}^2 \leqslant \left(\bar{I}\right)^2 \tag{27}$$

式中，$\underline{U}$ 和 $\overline{U}$ 分别为配电网节点电压的安全上、下限；$\bar{I}$ 为配电网线路电流的安全上限。

3）DG 运行约束。

该约束式为

$$Q_{t,i}^{\text{DG}} = P_{t,i}^{\text{DG}} \tan\theta_i^{\text{DG}} \tag{28}$$

$$\sqrt{\left(P_{t,i}^{\text{DG}}\right)^2 + \left(Q_{t,i}^{\text{DG}}\right)^2} \leqslant S_i^{\text{DG}} \tag{29}$$

式中，θ_i^{DG} 为节点 i 处 DG 的功率因数角；S_i^{DG} 为节点 i 处 DG 的额定容量。

4）季节性负荷约束。

该约束式为

$$P_{t,i}^{\text{SL}} = \left(1 + \lambda_{t,i}^{\text{P}}\right) P_{t,i}^{\text{L}} \tag{30}$$

$$Q_{t,i}^{\text{SL}} = \left(1 + \lambda_{t,i}^{\text{Q}}\right) Q_{t,i}^{\text{L}} \tag{31}$$

式中，$P_{t,i}^{\text{L}}$ 和 $Q_{t,i}^{\text{L}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的日常负荷消耗的有功和无功功率；$\lambda_{t,i}^{\text{P}}$ 和 $\lambda_{t,i}^{\text{Q}}$ 分别为 t 时刻节点 i 处的有功和无功季节性负荷因子。

5) 变压器运行约束。

该约束式为

$$U_{t,i}^2 = k_{t,ij}^2 U_{t,j}^2 \tag{32}$$

$$k_{t,ij} = k_{ij,0} + K_{t,ij}\Delta k_{ij} \tag{33}$$

$$\sum_{t=1}^{N_T} |K_{t,ij} - K_{t-1,ij}| \leqslant \bar{\Delta}^{\mathrm{TF}} \tag{34}$$

$$-\bar{K}_{ij} \leqslant K_{t,ij} \leqslant \bar{K}_{ij}, K_{t,ij} \in \mathbb{Z} \tag{35}$$

式中，$k_{t,ij}$为t时刻线路m_{ij}处变压器的电压变比；$k_{ij,0}$为线路m_{ij}处变压器初始的电压变比；$K_{t,ij}$为t时刻线路m_{ij}变压器所处的档位；Δk_{ij}为线路m_{ij}处变压器档位变化量；$\bar{\Delta}^{\mathrm{TF}}$为变压器每日最大允许动作次数；$\bar{K}_{ij}$为线路$m_{ij}$处变压器最大可调档位。

除应满足变压器可调档位的约束外，变压器传输的有功与无功功率还须满足变压器的容量限制，即

$$\sqrt{\left(P_{t,ij}^{\mathrm{TF}}\right)^2 + \left(Q_{t,ij}^{\mathrm{TF}}\right)^2} \leqslant S_{ij}^{\mathrm{TF}} \tag{36}$$

式中，$P_{t,ij}^{\mathrm{TF}}$、$Q_{t,ij}^{\mathrm{TF}}$分别为t时刻m_{ij}线路处的变压器支路传输的有功与无功功率；S_{ij}^{TF}为m_{ij}线路处的变压器的容量。

6) SOP运行约束。

SOP的运行约束如式(2)～(6)所示。

7) EV充电运行约束。

EV充电运行约束如式(7)～(16)所示。

2.3 模型转换和实现流程

2.3.1 线性化

将式(37)的变量替换式(18)、式(20)～(23)、式(26)～(27)、(32)中的电压和电流的平方项[34-35]，并对其进行线性化处理，则有

$$\begin{cases} I_{t,ij}^2 = l_{t,ij}, & \forall m_{ij} \in \Omega_{\mathrm{B}} \\ U_{t,i}^2 = v_{t,i}, & \forall i \in \Omega_{\mathrm{N}} \end{cases} \tag{37}$$

式中，Ω_{N}为配电网节点的集合；$l_{t,ij}$为t时刻线路m_{ij}的电流的平方；$v_{t,i}$为t时刻节点i处的电压的平方。

则变压器运行约束式(29)可写作

$$v_{t,i} = k_{t,ij}^2 v_{t,j} \tag{38}$$

式(33)中的变压器的可调档位$K_{t,ij}$为整数变量，可用一组二进制$b_{t,ij,k}$来表示[36-37]，即

$$K_{t,ij} = \sum_{k=0}^{\overline{2K}_{t,ij}} \leqslant \left[\left(k - K_{t,ij}\right) b_{t,ij,k}\right] b_{t,ij,k} \tag{39}$$

$$\sum_{k=0}^{\overline{2K}_{ij}} b_{t,ij,k} = 1,\ b_{t,ij,k} \in \{0,1\} \tag{40}$$

式中，$b_{t,ij,k}$为t时刻线路m_{ij}处变压器的可调档位的辅助变量；K为分接开关的具体档位序号。

再将式(33)、(39)带入式(38)，则有

$$v_{t,i} = \sum_{k=0}^{\overline{2K}_{ij}} \left[\left(k_{ij,0} + \left(k - \overline{K}_{ij}\right)\Delta k_{ij}\right)^2 + v_{t,j} b_{t,ij,k}\right] \tag{41}$$

由于$v_{t,j} b_{t,ij,k}$仍是非线性的，再将非线性乘积$v_{t,j} b_{t,ij,k}$用变量$v_{t,ij,k}^{\mathrm{c}}$表示，则式(41)转化为线性化式，即

$$v_{t,i} = \sum_{k=0}^{\overline{2K}_{ij}} \left[\left(k_{ij,0} + \left(k - \overline{K}_{ij}\right)\Delta k_{ij}\right)^2 + v_{t,ij,k}^{\mathrm{c}}\right] \tag{42}$$

同时，须再添加约束：

$$\left(\underline{U}_j\right)^2 b_{t,ij,k} \leqslant v_{t,ij,k}^{\mathrm{c}} \leqslant \left(\overline{U}_j\right)^2 b_{t,ij,k} \tag{43}$$

$$\left(\underline{U}_j\right)^2 (1 - b_{t,ij,k}) \leqslant v_{t,j} - v_{t,ij,k}^{\mathrm{c}} \leqslant \left(\overline{U}_j\right)^2 (1 - b_{t,ij,k}) \tag{44}$$

式中，$\underline{U}_j$、$\overline{U}_j$分别为配电网节点j的电压U_j的安全下限与上限。

式(34)中含有的绝对值项，引入辅助变量$A_{t,ij}^{+}$和$A_{t,ij}^{-}$，将其线性化。$A_{t,ij}^{+}$和$A_{t,ij}^{-}$分别为t时刻支路ij处变压器抽头动作的正、负变化量。加入辅助变量后，式(34)可以线性化为

$$\sum_{t=1}^{N_T} \left(A_{t,ij}^{+} + A_{t,ij}^{-}\right) \leqslant \bar{\Delta}^{\mathrm{TF}} \tag{45}$$

$$K_{t,ij} - K_{t-1,ij} = A_{t,ij}^{+} - A_{t,ij}^{-} \tag{46}$$

$$A_{t,ij}^{+} \geqslant 0, A_{t,ij}^{-} \geqslant 0 \tag{47}$$

将目标函数中的最小电压偏差进行线性化，引入表示电压偏差程度的辅助变量$A_{t,i}$则约束目标函数式(19)可线性化为

$$f_{\mathrm{V}} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{N}}} A_{t,i} \tag{48}$$

式中，$A_{t,i}$为t时刻节点i处的电压越限辅助变量。

增加一些等效约束，即

$$\begin{cases} A_{t,i} \geqslant v_{t,i} - (U_{\max})^2 \\ A_{t,i} \geqslant -v_{t,i} + (U_{\min})^2 \end{cases} \tag{49}$$

$$A_{t,i} \geqslant 0 \tag{50}$$

2.3.2 二阶锥转化

使用变量替换后的式(23)中仍然具有非线性的二次项乘积$l_{t,ij} v_{t,i}$，须进一步采用二阶锥松弛，则有

$$l_{t,ij} \geqslant \frac{(P_{t,ij})^2 + (Q_{t,ij})^2}{v_{t,i}} \tag{51}$$

SOP运行约束式(5)、(6)均为非线性约束，将其转换为旋转锥约束，即

$$\begin{cases} (P_{t,i}^{\mathrm{SOP}})^2 + (Q_{t,i}^{\mathrm{SOP}})^2 \leqslant 2\dfrac{S_i^{\mathrm{SOP}}}{\sqrt{2}}\dfrac{S_i^{\mathrm{SOP}}}{\sqrt{2}} \\ (P_{t,j}^{\mathrm{SOP}})^2 + (Q_{t,j}^{\mathrm{SOP}})^2 \leqslant 2\dfrac{S_j^{\mathrm{SOP}}}{\sqrt{2}}\dfrac{S_j^{\mathrm{SOP}}}{\sqrt{2}} \end{cases} \tag{52}$$

同理，变压器运行约束条件(36)为非线性约束，将其转换为旋转锥约束，即

$$(P_{t,ij}^{\mathrm{TF}})^2+(Q_{t,ij}^{\mathrm{TF}})^2\leqslant 2\frac{S_{ij}^{\mathrm{TF}}}{\sqrt{2}}\frac{S_{ij}^{\mathrm{TF}}}{\sqrt{2}} \tag{53}$$

2.4　联合调控策略流程

为尽可能降低变压器的投资扩容需求，本文提出了一种联合调控策略，通过智能软开关实现变压器柔性互联、电动汽车有序充电与变压器经济扩容的协调配合。联合调控策略流程如图 2 所示。

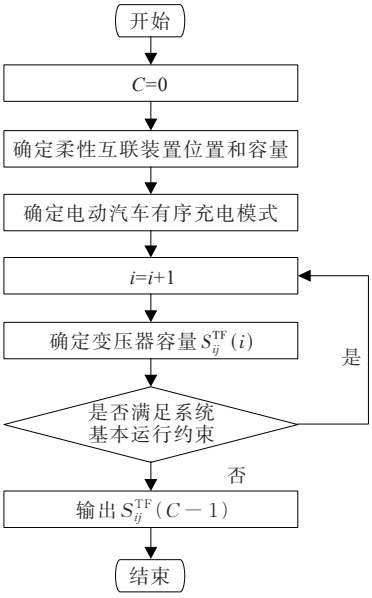


图 2　联合调控策略流程

Figure 2　Flow of joint regulation strategy

在图 2 中，$S_{ij}^{\mathrm{TF}}(C)$为第 C 次循环变压器容量数值。

3　算例分析

3.1　测试配电网与参数设置

采用 IEEE 33 节点配电网对该模型进行测试，33 节点配电网结构如图 3 所示。

在图 3 中，该配电网中变压器高压侧的基准电压为 12.66 kV，低压侧的基准电压为 0.38 kV，其他参数详见文献[38-39]。

光伏和风机的参数见表 1。光伏与风机的功率因数均为 0.9。从图 1 中可以看出，节点 25 为农村地区中的接入节点。农村大规模光伏容量扩大为基本光伏容量的 1.5 倍，季节性负荷因子根据实际负荷数据和历史经验确定，$\lambda_{t,i}^{\mathrm{P}}$ 和 $\lambda_{t,i}^{\mathrm{Q}}$ 的值均为 2。在节点 33 处接入 EV 充电站，此处共有充电桩 30 个(包括快充桩 26 个，慢充桩 4 个)。在节点 24、25 之间、节点 32、33 之间各有一个理想变压器，每个理想变压器各有 10 个可调抽头，每个抽头的调节率为

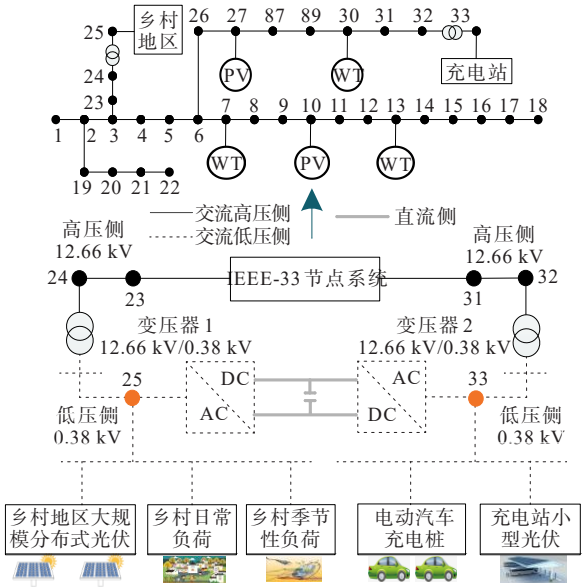


图 3　IEEE 33 节点配电网结构

Figure 3　Structure of IEEE 33-node distribution network

1%。频繁的切换动作会带来安全风险，故设可调变压器的调节次数上限为 4 次/d[37]。这 2 组 SOP 容量均为 0.5 MV·A。式(2)、(3)中的损耗系数 A_i^{SOP} 和 A_j^{SOP} 的值均为 0.02。

表 1　光伏和风机的参数

Table 1　Parameters of photovoltaic and wind turbines

节点	类型	容量	节点	类型	容量
7	WT	500	10	PV	500
13	WT	1 000	25	PV	300
27	PV	400	30	WT	1 000
33	PV	1 000			

根据 EV 用户用车和充电习惯，无序充电 EV 用户在剩余电量满足一定范围时选择充电，接入充电站时刻满足 N(0.30，0.10)的正态分布。有序充电 EV 用户多为通勤用车，通常 3 d 充一次电，该类电动汽车发时刻服从 N(8.00，1.00)的正态分布，每天行驶里程服从 N(7.98，1.10)的正态分布，其充电时间主要是在晚上。配电网共包含无序充电汽车 10 辆，有序充电汽车 30 辆，所有电动汽车平均行驶速度 35 km/h，能量消耗率为 0.15 kW·h/km[29]。电动汽车电池容量为 100 kW·h，充、放电效率均为 0.95，充、放电功率分别为 10 kW 与 60 kW，I_{SoC} 的上、下限分别为 1.0 与 0.2。

其他仿真参数设置[38]见表 2。

表 2 其他仿真参数设置

Table 2 Other simulation parameter settings

α_1	α_2	C_{loss}/(元·kW^{-1}·h^{-1})	C_{tap}/(元·次$^{-1}$)	C_e/(元·kW^{-1}·h^{-1})	A_i^{SOP}
0.833	0.167	0.08	1.4	3.376	0.02
$\underline{U}$/p.u.	$\overline{U}$/p.u.	$\tan\theta_i^{DG}$	$\overline{\Delta}^{TF}$/次	U_{min}/p.u.	U_{max}/p.u.
0.93	1.07	0.9	4	0.97	1.03

3.2 优化结果分析

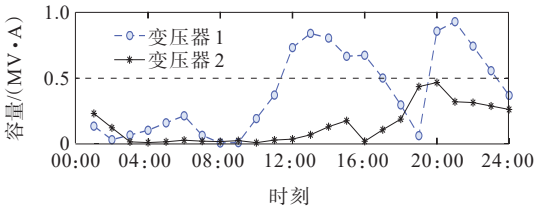
以每小时作为一个时间断面，开展联合调控优化调度。本文设置了3种方案来验证所提调控模型的有效性。

1）方案1：EV充电桩接入，SOP不接入。

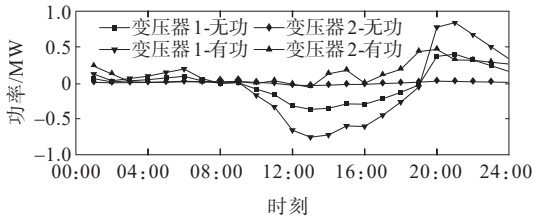
2）方案2：EV充电桩接入，SOP接入，EV充电站采用无序充电商业模式。

3）方案3：EV充电桩接入，SOP接入，EV充电站采用本文商业模式。

在图3中，该配电网的节点33的EV充电站安装了26个功率慢充桩和4个快充桩。IEEE 33节点配电网的最大有功负荷为500 kW。方案1的变压器运行数据如图4所示。方案2的变压器容量使用情况如图5所示。图5中变压器2的所需容量最大为0.500 MV·A。为防止所有EV同时以最大功率充电，充电站变压器容量为0.500 MV·A。节点25在满足农村地区正常用电的基础上，保留10%～30%的容量裕度，故变压器1容量为0.315 MV·A。



（a）变压器传输功率所需容量



（b）变压器传输有功功率

图 4 方案1的变压器运行数据

Figure 4 Transformer operation data for case 1

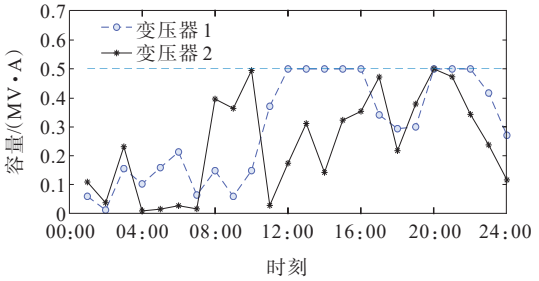


图 5 方案2的变压器容量使用情况

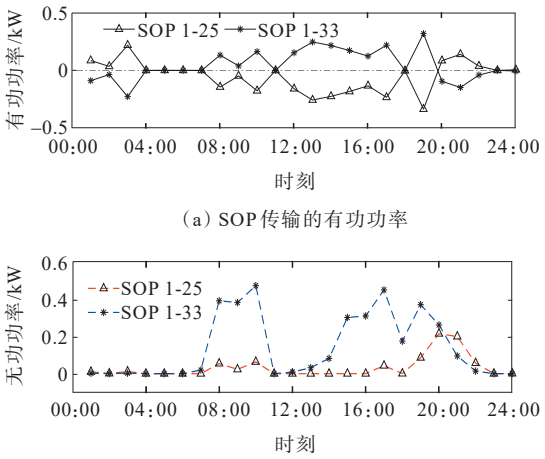
Figure 5 Capacity usage of transformer in case 2

在方案1中，由于EV充电桩与农村分布式光伏大规模接入，季节性负荷处于高峰。从图4中可以看出，节点25在午间出现了光伏有功功率大量倒送的情况，这导致所需变压器容量超过变压器额定容量；在晚间，该农村地区的季节性负荷增大，变压器1传输的有功功率大幅增加，导致变压器的所需容量也超过额定容量。然而，此时的变压器2的大部分时间均处于低负载状态，农村地区充电站充电的流动性车辆少，EV车辆通常在固定时间接入充电桩。因此，大多数时间的充电站充电负荷极低，变压器2运行负载降低甚至接近空载，变压器电损率上升。此时，由于这2个变压器没有柔性互联，这2个变压器分别出现严重过载和多时段严重低载。若要保证配电网的安全运行，变压器1至少须扩容至1 MV·A。

在方案2中，由于SOP的加入，变压器2容量扩容至0.500 MV·A即可满足配电网安全运行的要求。从图5中可以看出，在变压器1所需容量超过额定容量时，该设备在对应时段内始终以额定容量稳定运行。在此时段内，如果借助变压器2的冗余容量来缓解变压器1的容量不足问题，还能提高变压器2的设备利用率。

方案2的SOP传输功率如图6所示。

从图6中可以看出，在12:00—17:00，节点25通过SOP向节点33传输大量有功功率，以降低原先通过变压器1所倒送的有功功率。SOP的互联能有效消纳冗余光伏功率，且其冗余功率可利用变压器2冗余容量倒送至配电网中有功不足的节点。同样地，在20:00—22:00，从节点33通过SOP向节点25传输大量有功功率，节点25的季节性负荷增大，导致变压器1传输有功功率大幅增加，通过变压器2和SOP向节点25传输有功功率，为节点25季节性负荷提供所需功率，减少通过变压器1传输的功率，实现容量互济。



（a）SOP 传输的有功功率

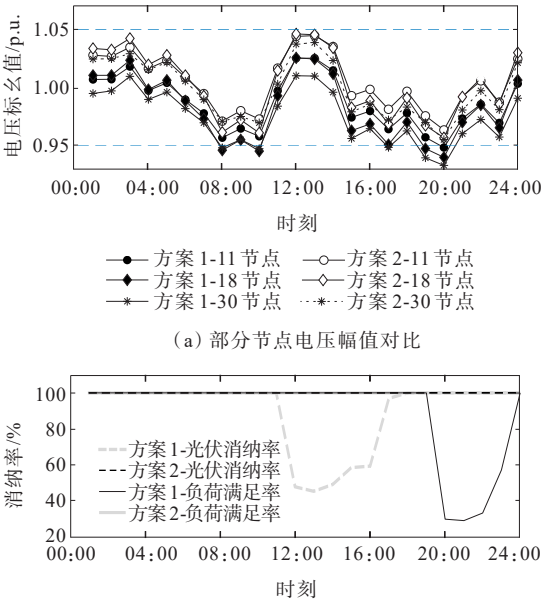
（b）SOP 传输的无功功率

图 6　方案 2 的 SOP 传输功率

Figure 6　Transmitted power of SOP in case 2

从图 6 中还可以看出，在 08:00—10:00 和 15:00—22:00 这 2 个时段，SOP 向节点 33 传输大量无功功率，这说明节点 33 所在支路的无功不足。在柔性互联之后，SOP 提供的无功功率可为节点 33 所在的支路提供无功支撑。

方案 1 与方案 2 对比如图 7 所示。



（a）部分节点电压幅值对比

（b）光伏消纳率和负荷满足率对比

图 7　方案 1 与方案 2 的对比

Figure 7　Comparison between case 1 and case 2

从图 7(a)中可以看出，方案 1 中节点电压均明显低于方案 2 中对应的节点电压。这说明 SOP 传输的无功功率能明显改善配电网中部分节点无功不足的问题，显著降低配电网的电压偏差。SOP 的功能不仅体现在传递有功功率实现变压器容量之间的互济，其还能传递无功功率以改善配电网的电压水平。从图 7(b)中可以看出，在方案 1 中，在午间，该地出现了光伏倒送情况，这导致 2 个变压器所需容量不足，必须通过弃光来保证变压器安全运行；在夜间，该地季节性负荷增加导致的变压器容量不足也只能通过切除负荷来保证变压器安全进行。因此，该地午间的光伏消纳率大幅降低，其最低光伏消纳率仅为 50%，该地晚间的季节性负荷的满足率甚至仅有 30%。方案 2 通过将变压器低压侧进行柔性互联，保证光伏可完全在本地配电网中消纳，且其季节性负荷也得到了 100% 的满足。

方案 3 中电动汽车采用本文所提的商业模式，部分 EV 采用有序充电模式。方案 3 的变压器扩容后容量使用情况如图 8 所示。方案 3 的有序充电模式下 EV 电池容量如图 9 所示。在方案 3 中，EV 可在凌晨负荷低谷期间，利用风能为自身充电。在接入充电桩至 24:00 这段时间，大部分 EV 均处于不充电、不放电的状态，甚至可能会有部分 EV 为弥补配电网有功的缺乏而选择为配电网供电。在次日凌晨，EV 开始充电，此时的居民负荷处于低谷，变压器 1 的负载率较低，且大量风力发电产生的有功无法消耗。EV 的有序充电解决了这 2 个问题。

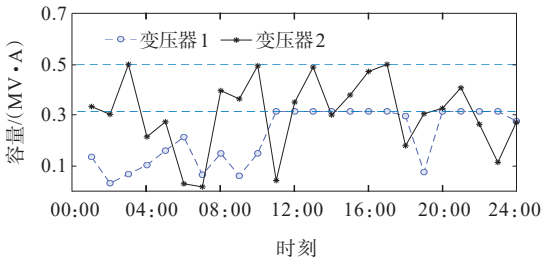


图 8　方案 3 的变压器扩容后容量使用情况

Figure 8　Capacity usage after transformer capacity expansion in case 3

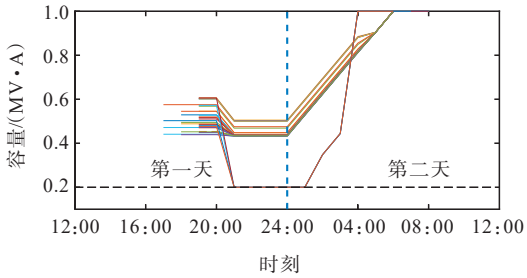


图 9　方案 3 的有序充电模式下电动汽车电池容量

Figure 9　Battery capacities of electric vehicles under orderly charging mode in case 3

方案2采用的EV无序充电模式，这会导致如图5所示的20:00时刻的变压器均处于满载的情况的发生。如果采用本文的EV有序充电商业模式，则不会出现居民季节性负荷与充电站负荷集中在18:00—20:00的情况。这不仅避免了变压器1、2同时处于满载状态的情况，还通过错峰使用变压器，实现容量互济，在彼此负载率低的时间段借用对方容量从而实现容量互济。从图8中可以看出，变压器1的容量为0.315 MV·A即可满足配电网的安全运行，不须额外扩容。所提方案可有效降低中国农村地区充电桩变压器扩容容量，提高农村配电网的经济性。

方案2与方案3在变压器容量相同时的对比见表3。方案3在加入EV有序充电模式后，配电网损耗和电压偏差均比方案2的有明显改善。这2种方案的变压器负载率均处于理想范围内，但其变压器综合过载率明显下降，提高了变压器容量互济的灵活性和安全性。

表3 方案2与方案3在变压器相同容量时的对比

Table 3 Comparison between case 2 and case 3 at the same transformer capacity

方案	配电网综合运行成本/元	电压越限率/%	负载率/%		变压器综合过载率/%
			变压器1	变压器2	
2	66.017 0	14.015 2	59.42	48.31	29.17
3	57.221 6	11.237 4	57.87	49.48	20.83

方案3在有序充电和SOP传输功率的联合优化下，变压器2的容量有了更宽泛的选择余地，其容量从不扩容的0.315 MW到充足容量均可。变压器2容量保持0.500 MW不变，对变压器1进行扩容。方案3在变压器1不同容量时的对比见表4。

表4 方案3在变压器1不同容量时的对比

Table 4 Comparison of transformer 1 with different capacities in case 3

变压器1容量	配电网综合运行成本/元	负载率/%		变压器综合过载率/%
		变压器1	变压器2	
0.315	62.956 2	69.43	60.43	29.17
0.400	59.974 1	63.73	54.84	25.00
0.500	57.221 6	57.87	49.48	20.83
无约束	53.096 6		43.29	

由表3、4可知，如果在保证变压器综合过载率不超过30%的前提下，变压器1保持0.315 MV·A的容量即可。相较于无约束时按照最大扩容容量进行扩容，这可较大程度地减少投资，且其在配电网损耗方面并没有明显的增加。相较于方案2最小扩容容量0.500 MW，方案3在必要扩容容量方面有了非常明显的降低，虽然运行损耗有所增加，但扩容成本大幅降低，整体上提升了整个配电网的经济性。

4 结语

针对中国农村地区季节性负荷波动大、分布式光伏大规模接入导致配电变压器容量不足与扩容后负载率低的问题，本文提出一种面向新能源消纳和季节性负荷供应的低压柔性互联调控策略。该策略通过联合调控提升变压器扩容的安全性与经济性，有效改善配电网运行的经济性和稳定性。根据仿真测试结果分析，可以得出以下结论：

1）相较于没有进行柔性互联的模型，在进行柔性互联之后，新能源消纳困难和季节性负荷供应压力较大的问题可以通过2个变压器容量互济得到有效解决。同时，变压器在须扩容时不必按照自身最大需求量扩容，解决了变压器盲目扩容后的大多数时间冗余容量过大、负载率过低等问题。

2）柔性互联配电网可不仅能提高整个配电网对于分布式光伏装机容量较高的农村地区的消纳能力，改善季节性负荷过大时负荷满足率低的问题，还能提高整个配电网的电压稳定性，有效地降低配电网的电压越限率。

3）EV有序充电的商业模式可让EV根据配电网的负荷和电源发电情况灵活调节充、放电，不仅可以实现变压器容量的互济，进行容量的调控，还可提高中国农村地区新能源消纳能力。

参考文献：

[1] 蔡建逸，雷金勇，高永键，等. 基于春节负荷预测的配电变压器调换策略[J]. 南方电网技术，2021，15(7): 96-101.
CAI Jianyi, LEI Jinyong, GAO Yongjian, et al. Distribution transformer switching strategy based on spring festival load forecasting[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(7): 96-101.

[2] 高红均，郭明浩，刘挺坚，等. 新型电力系统电力电量平衡分析研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(7): 2683-2696.
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Tingjian, et al.

Review on electric power and energy balance analysis of new-generation power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2683-2696.

[3] 姚伟，刘彦彦，郭志明. 实现配电变压器效率最大化的治理方法研究[J]. 电力科学与工程，2024, 40(8): 29-36.
YAO Wei, LIU Yanyan, GUO Zhiming. Research on governance method to maximize the efficiency of distribution transformers[J]. Electric Power Science and Engineering, 2024, 40(8): 29-36.

[4] 吉兴全，连承宇，张玉敏，等. 基于智能软开关的三相不平衡配电网动态重构策略[J]. 智慧电力，2023, 51(5): 111-118.
JI Xingquan, LIAN Chengyu, ZHANG Yumin, et al. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks based on SOP[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 111-118.

[5] 何叶，杨晓东，吴红斌，等. 面向新型配电系统灵活性提升的智能软开关与储能系统协调规划[J]. 电力系统自动化，2023, 47(18): 142-150.
HE Ye, YANG Xiaodong, WU Hongbin, et al. Coordinated planning of soft open point and energy storage system for flexibility enhancement of new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 142-150.

[6] 王成山，季节，冀浩然，等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化，2022, 46(4): 1-14.
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.

[7] 倪伟东，范心明，孙广慧，等. 基于元模型的智能软开关就地控制策略优化方法[J]. 南方电网技术，2020, 14(7): 73-80.
NI Weidong, FAN Xinming, SUN Guanghui, et al. Optimization method of local control strategy of soft open point based on metamodel[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(7): 73-80.

[8] 刘艳萍，李欣，杨景旭，等. 区域专变容量互济的有序充电调节难度评估与控制优化[J]. 南方电网技术，2022, 16(6): 104-112.
LIU Yanping, LI Xin, YANG Jingxu, et al. Difficulty evaluation and control optimization of orderly charging regulation with mutual assistance of regional special transformer capacity[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 104-112.

[9] 刘晨苗. 适应季节性负荷的配电变压器网络优化规划方法[D]. 北京：华北电力大学，2020.
LIU Chenmiao. Optimal planning method of distribution transformer network for seasonal load[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.

[10] 朱传谱，李聪，宋丽珠，等. 考虑电网扩容的配电自动化系统规划[J]. 电力科学与技术学报，2021, 36(6): 11-19.
ZHU Chuanpu, LI Cong, SONG Lizhu, et al. Distribution automation system planning considering grid capacity expansion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 11-19.

[11] 杨贺钧，王井寅，马英浩，等. 考虑功率互济的多区域电网储能系统联合优化配置[J]. 电力建设，2024, 45(2): 79-89.
YANG Hejun, WANG Jingyin, MA Yinghao, et al. Joint planning of energy storage systems for multi-area grids considering power interconnection[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 79-89.

[12] 张伟骏，李智诚，陈大玮，等. 配网侧分布式储能系统的随机优化配置和选址方法[J]. 高压电器，2023, 59(7): 125-135.
ZHANG Weijun, LI Zhicheng, CHEN Dawei, et al. Stochastic optimal configuration and site selection method of grid-side distributed energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 125-135.

[13] 杨景旭，周来，张勇军，等. "专变共享" 模式下考虑时变电价和转移概率的EV有序充电[J]. 电力自动化设备，2020, 40(10): 173-180+193.
YANG Jingxu, ZHOU Lai, ZHANG Yongjun, et al. Ordered charging of EVs considering time-varying electricity price and transition probability under “dedicated transformer sharing” mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 173-180+193.

[14] 王一迪，李立新，於益军，等. 基于深度强化学习的电力系统安全校正控制[J]. 电力系统自动化，2023, 47(12): 121-129.
WANG Yidi, LI Lixin, YU Yijun, et al. Power system security correction control based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 121-129.

[15] 于雨彤，王灿，李勇，等. 高比例光伏接入的配电网多层级反向重过载风险评估[J]. 高电压技术，2024, 50(10): 4540-4549.
YU Yutong, WANG Can, LI Yong, et al. Multi-level reverse heavy overload risk assessment for distribution system with high percentage of photovoltaic access[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4540-4549.

[16] 刘亚南，徐研，韩华春，等. 多端背靠背柔性直流互联系统负载均衡[J]. 电力工程技术，2018, 37(3): 84-90.
LIU Yanan, XU Yan, HAN Huachun, et al. Load balancing of multi-terminal back-to-back flexible DC interconnection system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 84-90.

[17] 高正创，李凤婷，解超，等. 基于电压行波陡度的柔性

直流送出线路快速保护方案[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 84-93.
GAO Zhengchuang, LI Fengting, XIE Chao, et al. Fast protection scheme for flexible DC transmission line based on voltage traveling wave steepness[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(4): 84-93.

[18] 田皓, 谭浩. 基于趋势理论的源–网–荷协调性控制[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 132-141.
TIAN Hao, TAN Hao. Source-grid-load coordination analysis based on trend theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 132-141.

[19] 刘泽洪, 周原冰, 金晨. 支撑新能源基地电力外送的电源组合优化配置策略研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 101-112.
LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, JIN Chen. Optimization strategy study on installation mix of renewable energy power base for supporting outbound delivery[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 101-112.

[20] JAHANGIR H, GOUGHERI S S, VATANDOUST B, et al. Plug-in electric vehicle behavior modeling in energy market: a novel deep learning-based approach with clustering technique[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4738-4748.

[21] VAN DEN BERG M A, LAMPROPOULOS I, ALSKAIF T A. Impact of electric vehicles charging demand on distribution transformers in an office area and determination of flexibility potential[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2021, 26: 100452.

[22] 王岩庆, 王骁, 丛若晨, 等. 考虑配电网运行安全的出行电动汽车充电引导策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 2131-2139.
WANG Yanqing, WANG Xiao, CONG Ruochen, et al. Charging guidance strategy of traveling electric vehicle considering the operation safety of distribution network [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2131-2139.

[23] 梁振锋, 祁芙蓉, 王国阳, 等. 电动汽车有序充电优化策略综述[J]. 新型电力系统, 2023(3): 256-271.
LIANG Zhenfeng, QI Furong, WANG Guoyang, et al. Review of optimization strategies for orderly charging of electric vehicles[J]. New Type Power Systems, 2023(3): 256-271.

[24] 石文超, 吕林, 高红均, 等. 考虑需求响应和电动汽车参与的主动配电网经济调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 41-51.
SHI Wenchao, LYU Lin, GAO Hongjun, et al. Economic dispatch of active distribution network with participation of demand response and electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 41-51.

[25] 严建海, 张保, 黄刚, 等. 台区柔直互联系统在农村地区的应用研究[J]. 供用电, 2022, 39(8): 58-66.
YAN Jianhai, ZHANG Bao, HUANG Gang, et al. Application research on distribution stations DC flexible interconnection system in rural areas[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(8): 58-66.

[26] 范美芳. 分布式光伏接入农村配电网电压质量治理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
FAN Meifang. Research on voltage quality governance of distributed photovoltaicaccess to rural distribution [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[27] 黎立丰, 刘春晓, 朱浩骏, 等. 考虑网络安全约束的可再生能源消纳能力评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 162-168.
LI Lifeng, LIU Chunxiao, ZHU Haojun, et al. Absorptive capability evaluation method of renewable energy considering security constraints of power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 162-168.

[28] 范心明, 孙广慧, 彭元泉, 等. 智能配电柔性多状态开关在主动配电网中的应用[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 40-48.
FAN Xinming, SUN Guanghui, PENG Yuanquan, et al. Application of flexible distribution switch in active distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 40-48.

[29] 项顶, 胡泽春, 宋永华, 等. 通过电动汽车与电网互动减少弃风的商业模式与日前优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6293-6303.
XIANG Ding, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Business model and day-ahead dispatch strategy to reduce wind power curtailment through vehicle-to-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6293-6303.

[30] 侯岚, 李玉杰, 贾晓明, 等. 考虑EV负荷的微电网多主体联合容量优化配置方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 127-134.
HOU Lan, LI Yujie, JIA Xiaoming, et al. Optimization of capacity configuration method for multi-agent microgrid considering EV load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 127-134.

[31] 蔡晖, 祁万春, 韩杏宁, 等. 提升风电接入系统可用输电能力的混合型潮流控制器双层优化配置[J]. 全球能源互联网, 2025, 8(5): 615-624.
CAI Hui, QI Wanchun, HAN Xingning, et al. Bi-level optimal configuration of hybrid power flow controller for enhancing available transfer capability of wind power integrated system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2025, 8(5): 615-624.

[32] 陈鹏, 刘友波, 袁川, 等. 考虑电动汽车充电模式的配电网可开放容量提升改造策略[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 177-186.
CHEN Peng, LIU Youbo, YUAN Chuan, et al. Strategy

for enhancing the available capacity of distribution networks considering electric vehicle charging modes[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 177-186.

[33] 姜晓锋，魏巍，王永灿，等．“车–路–网”协同优化下的电动汽车有序充电引导策略[J]. 电力科学与技术学报，2023, 38(5): 44-56.
JIANG Xiaofeng, WEI Wei, WANG Yongcan, et al. Orderly charging guidance strategies for electric vehicles under EVs-Traffic-Distribution collaborative optimization [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 44-56.

[34] YANG X D, XU C B, ZHANG Y B, et al. Real-time coordinated scheduling for ADNs with soft open points and charging stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5486-5499.

[35] 高红均，刘俊勇，沈晓东，等．主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报，2017, 37(6): 1634-1645.
GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.

[36] YANG X D, SONG Z H, WEN J Y, et al. Network-constrained transactive control for multi-microgrids-based distribution networks with soft open points[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3): 1769-1783.

[37] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1430-1442.

[38] YANG X D, XU C B, HE H B, et al. Flexibility provisions in active distribution networks with uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 553-567.

[39] YANG X D, ZHANG Y B, WU H F, et al. Enabling online scheduling for multi-microgrid systems: an event-triggered approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 1836-1852.