

计及安全边界和智能软开关协同配置的 配电网分布式光伏准入容量优化

姚天宇¹,李勇¹,乔学博¹,韩宇^{1,2},矫舒美¹,曹一家¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;2. 江苏徐电建设集团有限公司,江苏 徐州 210009)

摘要:智能软开关(SOP)为促进配电网高渗透率光伏消纳提供了新的思路,为此将农网安全边界纳入配电网规划模型进行分布式光伏(DPV)准入容量优化研究。推导并分析考虑农网网损的改进安全边界模型,并提出其线性表达式;阐述SOP原理并建立应用于配电网规划的SOP数学模型;以DPV准入容量最大为目标,提出考虑改进安全边界和主动管理策略的DPV与SOP有功-无功协同优化配置模型;引入线性化近似将SOP模型等进行线性化,将原模型转化为混合整数线性规划模型,并采用GAMS进行优化求解。最后,基于某农网51节点算例验证所提模型和方法的有效性和正确性,并分析安全边界、主动管理措施、SOP容量对DPV最大准入容量的影响。

关键词:高渗透率光伏;分布式电源;农网;安全边界;线性化;准入容量;智能软开关

中图分类号:TM 615;TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202201024

0 引言

高渗透率可再生能源的接入使得配电系统规划与运行面临着巨大挑战。一方面,大量分布式电源(DG)的接入会导致电压波动^[1]、电压越限等安全问题;另一方面,DG规划配置的不合理、配电网调节能力的欠缺以及配电设备利用率低等严重限制了DG消纳。而电力电子装备的大量接入使配电网呈现电力电子化的发展趋势,其快速发展为解决上述问题提供了新的思路^[2]。

智能软开关(SOP)被用于代替多分段配电线路的联络开关,其功率连续无差调节特性可实现馈线间实时功率调动,改变系统潮流分布,提升配电网灵活性^[3]。文献[4]研究了含SOP的多电压等级配电网运行优化;文献[5]建立了综合考虑DG有功-无功协同以及SOP运行的配电网鲁棒优化运行模型。文献[4-5]中的模型均考虑了SOP网侧运行进行配

电网优化分析,采用SOP的非线性模型或将其转化为二阶锥形式进行问题求解,但非线性模型求解效率低。配电网规划人员可充分利用SOP等灵活性资源进行主动配电网DG规划。目前关于DG规划的研究主要分为以下2类:一类以配电网经济性成本为目标进行DG优化配置,另一类则以DG准入容量最大为目标^[6-11]。在经济性规划方面,文献[6]计及源荷关联场景建立以综合投资费用最小为目标的DG规划模型;文献[7]建立以DG投资商收益、配电网公司收益最大化为目标的多场景DG规划模型。在准入容量评估方面,文献[8]提出考虑多种主动管理策略的三相不平衡配电网DG准入容量规划模型;文献[9]提出计及SOP优化运行和其他安全约束的DG准入容量规划模型;文献[10]基于风电相关性场景建立以DG准入容量最大和电压偏移最小为目标的DG规划模型,用于评估配电网DG的最大准入容量。上述文献均基于典型日场景进行DG优化配置。随着光伏成本的不断降低,用户可在短期内收回光伏成本并获得收益。在我国碳达峰、碳中和目标下,当前研究重点是如何提升配电网分布式光伏(DPV)消纳能力。因此,本文计及DPV与负荷时序相关场景进行DPV准入容量的优化研究。

配电网安全边界理论为配电网优化提供了新的思路。在基础理论方面:文献[11]揭示了配电网安全边界的形成机理和规律;文献[12]研究了智能配电网N-1安全边界拓扑性质,简化在线安全评价及控制。在应用方面:文献[13]研究基于安全距离的配电网随机规划方法;文献[14]研究考虑N-1安全的多目标DG选址定容。但上述文献使用的安全边界模型中潮流模型均为直流潮流模型,该模型更多

收稿日期:2021-04-21;**修回日期:**2021-11-30

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点项目(2018YFE0125300);国家自然科学基金资助项目(52061130217);湖湘高层次人才聚集工程项目(2019RS1016);长沙市杰出创新青年计划(KQ2009037);湖南省研究生科研创新项目(CX20200429)

Project supported by the Key Intergovernmental Cooperation Project on International Science, Technology and Innovation of the National Key Research and Development Program of China(2018YFE0125300),the National Natural Science Foundation of China(52061130217),the Innovative Construction Program of Hunan Province(2019RS1016),the Excellent Innovation Youth Program of Changsha(KQ2009037) and the Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province(CX20200429)

地被应用于城市配电网。农网馈线具有线路长、电压降大等特点,导致线路损耗严重,特别是大量DG在农网的应用会对系统的安全性造成一定影响^[15]。因此,农网DG优化配置所造成的网损对安全边界的影响不能忽略。

针对DPV消纳问题,本文提出基于安全边界和SOP协同配置的配电网DPV准入容量优化方法。首先详细推导并分析考虑农村配电网改进安全边界模型;其次阐述SOP原理并建立应用于配电网规划的SOP数学模型;然后建立考虑改进安全边界约束、主动管理策略的DPV与SOP有功-无功协同规划模型,并将模型中非线性部分线性化,使原问题转化为混合整数线性规划模型(MILP);最后通过算例分析验证所提方法的有效性和正确性。

1 农村配电网安全边界

主动管理下考虑安全边界的柔性农村配电网规划思路如图1所示。传统配电网中无DG与主动控制手段,DG优化配置时只考虑电压、电流等常规约束。随着电力电子化电力系统的发展,电网结构及运行方式发生变化,规划方式也变得更加复杂,但大多数规划方法只考虑正常运行下配电网对DG的消纳。而安全边界理论考虑了N-1状态下配电网的运行状态,这对提升规划方案的可靠性具有重要意义。因此,本节重点阐述改进安全边界的数学表示及其在农网规划中的应用。

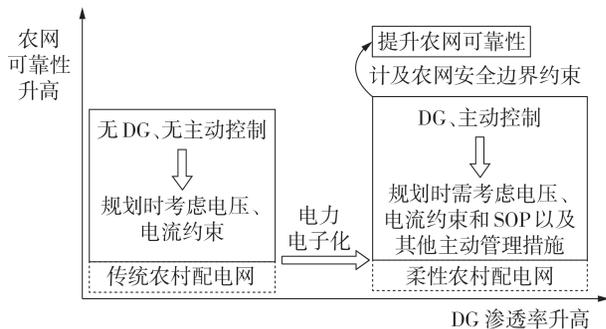


图1 考虑农网安全边界的柔性配电网规划思路

Fig.1 Planning idea of flexible distribution network considering security boundary of rural network

1.1 改进安全边界(农网)

配电网安全边界是指所有恰好满足N-1安全的临时工作点组成的线的集合,具体根据N-1仿真拟合算法得到^[16]。基于直流潮流的安全边界近似线性,其结果与精确边界间的误差很小,所以城市配电网安全边界忽略了网损,城市配电网安全边界如下:

$$S_{F_k}^t = \min \left(S_{F_{L,\max}}^t - S_{F_l}^t, S_{T,F_{L,\max}} - \sum_{F_m \in \Omega_{F_l}} S_{F_m}^t - \sum_{F_n \in \Omega_{F_l}, F_n \neq F_k} S_{F_n}^t \right) \quad (1)$$

式中:上标 t 表示 t 时刻; $S_{F_k}^t$ 为馈线 F_k 的负荷容量;

$S_{F_l}^t, S_{F_m}^t, S_{F_n}^t$ 分别为与馈线 F_k 有联络关系的馈线 F_l, F_m, F_n 的出口视在功率; $S_{F_{L,\max}}^t$ 为馈线 F_l 的最大容量; $S_{T,F_{L,\max}}$ 为馈线 F_l 所在主变的最大容量; F_m 为与馈线 F_l 连接在同一主变上的馈线; Ω_{F_l} 为馈线 F_l 所在主变所有馈线的集合; F_n 为与馈线 F_k 连接在同一主变上,且故障后随 F_k 一同转供的馈线; Ω_{F_k} 为与馈线 F_k 连接在同一主变上,且故障后其所带负荷与 $S_{F_k}^t$ 一同转移到某一主变上的馈线集合。

对于网损不可忽略的农村配电网,对式(1)进行改进加入网损,则农网中与馈线相关的安全边界方程为:

$$S_{F_k}^t + S_{F_k}^{t,L} = \min \left(S_{F_{L,\max}}^t - S_{F_l}^t - S_{F_l}^{t,L}, S_{T,F_{L,\max}} - \sum_{F_m \in \Omega_{F_l}} (S_{F_m}^t + S_{F_m}^{t,L}) - \sum_{F_n \in \Omega_{F_l}, F_n \neq F_k} (S_{F_n}^t + S_{F_n}^{t,L}) \right) \quad (2)$$

$$S_{F_l}^{t,L} = \sum_{ij \in \Omega_{F_l}} S_{ij}^{t,L} = \sum_{ij \in \Omega_{F_l}} \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2} |z_{ij}| \quad (3)$$

式中: $S_{F_k}^{t,L}, S_{F_l}^{t,L}, S_{F_n}^{t,L}, S_{F_m}^{t,L}$ 分别为馈线 F_k, F_l, F_n, F_m 上产生的功率总损耗; $S_{ij}^{t,L}$ 为线路 ij 上的损耗; $P_{ij,t}, Q_{ij,t}$ 分别为支路 ij 上流过的有功、无功功率; $V_{i,t}$ 为节点 i 的电压; $|z_{ij}|$ 为线路 ij 阻抗的模值; Ω_{F_l} 为馈线 F_l 上线路的集合。

下文的潮流方程采用了考虑网损的支路潮流,且式(2)、(3)中也计及了网损,因此可通过线性化潮流方程间接计算安全边界模型中的网损,将安全边界模型等效为线性模型,其中令:

$$\widehat{S}_{F_l}^t = S_{F_l}^t + S_{F_l}^{t,L} = P_{ij,t} + jQ_{ij,t} \quad \text{线路}ij\text{为}F_l\text{出口线路} \quad (4)$$

则有:

$$\widehat{S}_{F_l}^t = \sqrt{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2} \quad \text{线路}ij\text{为}F_l\text{出口线路} \quad (5)$$

由于:

$$v_{i,t} \mathcal{L}_{ij,t} = \frac{1}{2} \left[(v_{i,t} + \mathcal{L}_{ij,t})^2 - (v_{i,t}^2 + \mathcal{L}_{ij,t}^2) \right] \leq \frac{1}{2} (v_{i,t} + \mathcal{L}_{ij,t})^2 \quad (6)$$

再根据式(5)可得:

$$\widehat{S}_{F_l}^t \leq \frac{1}{\sqrt{2}} (v_{i,t} + \mathcal{L}_{ij,t}) \quad \text{线路}ij\text{为}F_l\text{出口线路} \quad (7)$$

式中: $v_{i,t}$ 为节点 i 电压幅值的平方; $\mathcal{L}_{ij,t}$ 为线路 ij 上电流的平方。

经过上述变换,农网安全边界模型可转换为:

$$\widehat{S}_{F_k}^t = \min \left(S_{F_{L,\max}}^t - \widehat{S}_{F_l}^t, S_{T,F_{L,\max}} - \sum_{F_m \in \Omega_{F_l}} \widehat{S}_{F_m}^t - \sum_{F_n \in \Omega_{F_l}, F_n \neq F_k} \widehat{S}_{F_n}^t \right) \quad (8)$$

式中: $\widehat{S}_{F_k}^t, \widehat{S}_{F_m}^t, \widehat{S}_{F_n}^t$ 分别为考虑网损后馈线 F_k, F_m, F_n 的出口视在功率。

1.2 安全边界验证(农网)

基于单回路配电网算例验证网损对其安全边界的影响。包含传统联络开关的单回路网络结构如图2所示。图中线路容量均为 $7 \text{ MV}\cdot\text{A}$,线路长度均为 4 km ,线路单位阻抗均为 $0.33+\text{j}0.38 \ \Omega/\text{km}$, S_1 、 S_2 分别为节点 N_1 、 N_2 上的负荷容量。

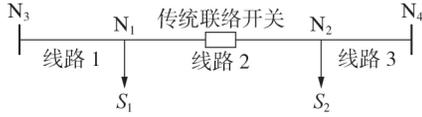


图2 单回路网络结构

Fig.2 Structure of single-loop network

对图2所示的单回路网络模型列写城网安全边界和农网安全边界约束,分别如式(9)、(10)所示,并计算2种网络的安全边界。根据上文潮流计算中网损的线性化,将损耗 S_1^L 和 S_2^L 近似线性化,则2种网络下的安全边界如图3所示。

$$\begin{cases} S_1 = \min(7, 7 - S_2) \\ S_2 = \min(7, 7 - S_1) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} S_1 + S_1^L = \min(7, 7 - S_2 - S_2^L) \\ S_2 + S_2^L = \min(7, 7 - S_1 - S_1^L) \end{cases} \quad (10)$$

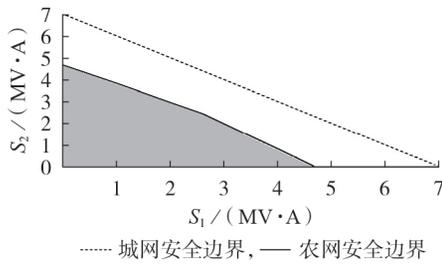


图3 安全边界对比

Fig.3 Comparison of security boundary

图3中城网安全运行域为城网安全边界与横纵轴所围成的三角形区域,而农网安全运行域则是由农网安全边界与横纵轴所围成的四边形区域。可以明显看出,考虑网损后,农网安全边界明显缩小,即不可以忽略农网的网损对安全边界的影响。

2 SOP原理与应用建模

SOP基于全控型电力电子器件实现控制,两端电压源型换流器(VSC)灵活多变的控制方式能快速准确地控制自身有功/无功功率流动,改善配电网潮流和电压分布。配电系统通常分为辐射状和环状网络,而接入SOP后的配电网成为一种混合系统,灵活的控制方式使其既具有辐射状网络开环运行的特点,又具有环状网络高可靠性的优点^[17]。SOP控制方式有以下特点^[18]。

1)灵活的有功/无功功率控制。两端VSC可根据幅值和相位建立独立的电压波形,可完全控制

流经直流线路的有功功率,两端可提供独立的无功功率。

2)瞬时独立电压控制。由VSC生成的电压波形可在几毫秒内实现动态控制,从而实现电压瞬时控制。

3)干扰和故障的隔离。VSC的瞬时过电压/过电流受控制策略的限制,故障线上的网络干扰/故障可通过VSC与另一侧隔离。

本文以背靠背VSC为例进行研究,基本结构如附录A图A1所示^[19]。在正常运行状态下,SOP的换流器 VSC_1 用于实现对功率传输的控制,而 VSC_2 则是实现对直流电压的稳定控制,即采用PQ-V_{dc}Q控制方式。此时SOP两端节点均可视为PQ节点,且由于中间直流环节的隔离作用,两端VSC的电压与无功功率相互独立。SOP应用于配电网规划问题时,其数学模型如下^[20]:

$$P_{i,t}^{\text{SOP}} + P_{i,t}^{\text{SOP,L}} + P_{j,t}^{\text{SOP}} + P_{j,t}^{\text{SOP,L}} = 0 \quad (11)$$

$$P_{i,t}^{\text{SOP,L}} = A_i^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{i,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{SOP}})^2} \quad (12)$$

$$P_{j,t}^{\text{SOP,L}} = A_j^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{j,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{SOP}})^2} \quad (13)$$

$$(P_{i,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{SOP}})^2 \leq (S_{ij}^{\text{SOP}})^2 \quad (14)$$

$$(P_{j,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{SOP}})^2 \leq (S_{ij}^{\text{SOP}})^2 \quad (15)$$

$$o_i = o_j \quad i, j \in \Omega_{\text{SOP}} \quad (16)$$

$$\sum (o_i + o_j) / 2 = N_{\text{SOP}} \quad i, j \in \Omega_{\text{SOP}} \quad (17)$$

$$\sum S_{ij}^{\text{SOP}} \leq S_{\text{max}}^{\text{SOP}} \quad (18)$$

式中: $P_{j,t}^{\text{SOP}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{SOP}}$ 分别为SOP注入节点 j 的有功、无功功率; $P_{i,t}^{\text{SOP,L}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{SOP,L}}$ 分别为节点 i 、 j 处SOP换流器的有功功率损耗; A_i^{SOP} 、 A_j^{SOP} 分别为节点 i 、 j 处SOP换流器的损耗系数; S_{ij}^{SOP} 为线路 ij 上SOP的安装容量; o_j 为0-1变量, $o_j=1$ 表示节点 j 接入SOP, $o_j=0$ 表示节点 j 不接入SOP; N_{SOP} 为配电网中SOP安装数量; $S_{\text{max}}^{\text{SOP}}$ 为配电网中SOP安装的最大容量; Ω_{SOP} 为安装SOP的线路两端节点的集合。需要说明的是,3.3节将对SOP模型进行线性化处理,这里不做阐述。

3 DPV与SOP协同优化配置模型

针对配电网DPV消纳,本文研究基于安全边界和SOP协同配置的DPV最大准入容量优化问题。将DPV的安装容量、SOP安装位置以及SOP的安装容量作为决策变量,考虑农村电网安全边界、主动管理策略等约束,提出以DPV准入容量最大为目标的DPV与SOP有功-无功协同优化配置模型。

3.1 目标函数

本文目标函数为最大化配电网DPV的准入容量,具体如下:

$$F = \max \sum_{i \in \Omega_{\text{DPV}}} P_i^{\text{DPV}} \quad (19)$$

式中: P_i^{DPV} 为接入节点 i 的DPV容量; Ω_{DPV} 为配电网

DPV接入的候选节点集合。

需要说明的是,随着电力电子器件成本的降低,SOP等电力电子器件将更多地被应用于电网优化运行。且本文重点分析SOP协同配置对DPV准入容量的提升作用,因此未将配电网投资和建设成本等作为目标函数。此外,文献[21]分析了SOP安装容量与规划总成本间的关系,本文基于文献[21]规划结果将SOP安装容量上限设定为1 MV·A。

3.2 约束条件

1)潮流约束。

采用支路潮流模型^[22]描述系统潮流,具体如下:

$$\sum_{ij \in \Omega_l} [P_{ij,t}^s - (I_{ij,t}^s)^2 r_{ij}] + P_{j,t}^s = \sum_{jk \in \Omega_l} P_{jk,t}^s + P_{j,t}^{\text{Load}} \quad (20)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} [Q_{ij,t}^s - (I_{ij,t}^s)^2 x_{ij}] + Q_{j,t}^s = \sum_{jk \in \Omega_l} Q_{jk,t}^s + Q_{j,t}^{\text{Load}} \quad (21)$$

$$P_{j,t}^s = \sum_{j \in \Omega_G} P_{j,t}^{s,G} + \sum_{j \in \Omega_{DPV}} P_{j,t}^{s,DPV} + \sum_{j \in \Omega_{SOP}} o_j P_{j,t}^{s,SOP} \quad (22)$$

$$Q_{j,t}^s = \sum_{j \in \Omega_G} Q_{j,t}^{s,G} + \sum_{j \in \Omega_{DPV}} Q_{j,t}^{s,DPV} + \sum_{j \in \Omega_{SOP}} o_j Q_{j,t}^{s,SOP} + \sum_{j \in \Omega_{SVC}} Q_{j,t}^{s,SVC} + \sum_{j \in \Omega_{SCB}} Q_{j,t}^{s,SCB} \quad (23)$$

$$(V_{i,t}^s)^2 - (V_{j,t}^s)^2 = 2(P_{ij,t}^s r_{ij} + Q_{ij,t}^s x_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(I_{ij,t}^s)^2 \quad ij \in \Omega_l \quad (24)$$

$$(P_{ij,t}^s)^2 + (Q_{ij,t}^s)^2 = (V_{i,t}^s)^2 (I_{ij,t}^s)^2 \quad ij \in \Omega_l \quad (25)$$

式中:上标 s 表示场景编号; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为线路 ij 的电阻、电抗; $P_{j,t}^s$ 、 $Q_{j,t}^s$ 分别为注入节点 j 的有功、无功功率之和;线路 jk 为与线路 ij 末端相连的线路; $P_{j,t}^{\text{Load}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{Load}}$ 分别为节点 j 所接负荷消耗的有功、无功功率; $P_{j,t}^{s,G}$ 、 $Q_{j,t}^{s,G}$ 分别为节点 j 处发电机注入电网的有功、无功功率; $P_{j,t}^{s,DPV}$ 、 $Q_{j,t}^{s,DPV}$ 分别为DPV注入节点 j 的有功、无功功率; $Q_{j,t}^{s,SVC}$ 、 $Q_{j,t}^{s,SCB}$ 分别为静止无功补偿装置(SVC)、并联电容器组(SCB)注入节点 j 的无功功率; $I_{ij,t}^s$ 为流过线路 ij 的电流; Ω_l 、 Ω_G 、 Ω_{SVC} 和 Ω_{SCB} 分别为线路集合、发电机接入的节点集合、SVC接入的节点集合和SCB接入的节点集合。

2)电流/电压约束。

为保证系统的安全性以及电能质量,各支路电流以及各节点电压应满足:

$$0 \leq (I_{ij,t}^s)^2 \leq (I_{ij}^{\text{max}})^2 \quad (26)$$

$$(V_i^{\text{min}})^2 \leq (V_{i,t}^s)^2 \leq (V_i^{\text{max}})^2 \quad (27)$$

式中: I_{ij}^{max} 为流过线路 ij 电流的上限值; V_i^{max} 、 V_i^{min} 分别为节点 i 电压的上、下限。

3)DPV约束。

DPV有功出力 $P_{i,t}^{s,DPV}$ 如式(28)所示。为充分利用DPV逆变器的无功支撑作用,假设其工作在最大功率点追踪模式^[5],则DPV无功出力 $Q_{i,t}^{s,DPV}$ 的取值范围如式(29)所示。

$$P_{i,t}^{s,DPV} = \Gamma_i^{s,DPV} P_i^{\text{DPV}} \quad i \in \Omega_{DPV} \quad (28)$$

$$-P_{i,t}^{s,DPV} \frac{\sqrt{1 - (\varphi_{\text{min}}^{\text{DPV}})^2}}{\varphi_{\text{min}}^{\text{DPV}}} \leq Q_{i,t}^{s,DPV} \leq P_{i,t}^{s,DPV} \frac{\sqrt{1 - (\varphi_{\text{min}}^{\text{DPV}})^2}}{\varphi_{\text{min}}^{\text{DPV}}} \quad (29)$$

式中: $\Gamma_i^{s,DPV}$ 为DPV出力系数; $\varphi_{\text{min}}^{\text{DPV}}$ 为DPV逆变器运行的最小功率因数。

4)无功补偿装置约束。

$$\begin{cases} Q_{j,t}^{s,SCB} = n_{j,t}^{s,SCB} q_j^{\text{SCB}} \\ 0 \leq n_{j,t}^{s,SCB} \leq N_j^{\text{SCB}} \end{cases} \quad j \in \Omega_{\text{SCB}}, n_{j,t}^{s,SCB} \in \mathbf{Z}^+ \quad (30)$$

$$Q_{j,\text{min}}^{\text{SVC}} \leq Q_{j,t}^{s,SVC} \leq Q_{j,\text{max}}^{\text{SVC}} \quad j \in \Omega_{\text{SVC}} \quad (31)$$

式中: $n_{j,t}^{s,SCB}$ 为节点 j 投入使用的SCB组数; q_j^{SCB} 为节点 j 投入使用的单组SCB的容量; N_j^{SCB} 为节点 j 能投入使用的最大SCB组数; $Q_{j,\text{max}}^{\text{SVC}}$ 、 $Q_{j,\text{min}}^{\text{SVC}}$ 分别为节点 j 处SVC能够发出无功功率的上、下限。

5)SOP运行约束如式(11)~(18)所示。

6)安全边界约束如式(8)所示。

3.3 模型线性化

上述模型中由于潮流约束式(20)~(25)和SOP运行约束式(12)~(16)是非线性约束,导致该模型是非凸非线性的NP难问题,难以求得最优解。因此,本节对上述非线性公式进行线性化转换,以快速求解模型。

1)平方项转换。

潮流约束式(20)、(21)和式(24)、(25)中包含电压、电流的平方项,即 $(V_{i,t}^s)^2$ 、 $(I_{ij,t}^s)^2$,则分别用 $\nu_{i,t}^s$ 和 $\zeta_{ij,t}^s$ 代替,依次转换为:

$$\sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,t}^s - \zeta_{ij,t}^s r_{ij}) + P_{j,t}^s = \sum_{jk \in \Omega_l} P_{jk,t}^s + P_{j,t}^{\text{Load}} \quad (32)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,t}^s - \zeta_{ij,t}^s x_{ij}) + Q_{j,t}^s = \sum_{jk \in \Omega_l} Q_{jk,t}^s + Q_{j,t}^{\text{Load}} \quad (33)$$

$$\nu_{i,t}^s - \nu_{j,t}^s = 2(P_{ij,t}^s r_{ij} + Q_{ij,t}^s x_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \zeta_{ij,t}^s \quad ij \in \Omega_l \quad (34)$$

$$(P_{ij,t}^s)^2 + (Q_{ij,t}^s)^2 = \nu_{i,t}^s \zeta_{ij,t}^s \quad ij \in \Omega_l \quad (35)$$

2)离散/连续变量积线性化。

潮流约束式(22)、(23)中有离散变量与连续变量的乘积项,导致模型非线性,难以求解。将式中的乘积项 $o_j P_{j,t}^{s,SOP}$ 、 $o_j Q_{j,t}^{s,SOP}$ 分别用变量 $\Lambda_{j,t}^{s,SOP}$ 、 $\Pi_{j,t}^{s,SOP}$ 等效^[23],则有:

$$P_{j,t}^s = \sum_{j \in \Omega_G} P_{j,t}^{s,G} + \sum_{j \in \Omega_{DPV}} P_{j,t}^{s,DPV} + \sum_{j \in \Omega_{SOP}} \Lambda_{j,t}^{s,SOP} \quad (36)$$

$$Q_{j,t}^s = \sum_{j \in \Omega_G} Q_{j,t}^{s,G} + \sum_{j \in \Omega_{DPV}} Q_{j,t}^{s,DPV} + \sum_{j \in \Omega_{SOP}} \Pi_{j,t}^{s,SOP} +$$

$$\sum_{j \in \Omega_{SVC}} Q_{j,t}^{s,SVC} + \sum_{j \in \Omega_{SCB}} Q_{j,t}^{s,SCB} \quad (37)$$

$$o_j P_{j,\text{min}}^{\text{SOP}} \leq \Lambda_{j,t}^{s,SOP} \leq o_j P_{j,\text{max}}^{\text{SOP}} \quad (38)$$

$$o_j Q_{j,\text{min}}^{\text{SOP}} \leq \Pi_{j,t}^{s,SOP} \leq o_j Q_{j,\text{max}}^{\text{SOP}} \quad (39)$$

3)二次型约束线性化。

将SOP的运行约束式(12)、(13)进行变换,可得:

$$(P_{i,t}^{s,SOP})^2 + (Q_{i,t}^{s,SOP})^2 = \left(\frac{P_{i,t}^{s,SOP,L}}{A_i^{\text{SOP}}} \right)^2 \quad (40)$$

$$(P_{j,t}^{s,SOP})^2 + (Q_{j,t}^{s,SOP})^2 = \left(\frac{P_{j,t}^{s,SOP,L}}{A_j^{SOP}} \right)^2 \quad (41)$$

将式(40)、(41)分别代入式(14)、(15)可推导得到:

$$P_{i,t}^{s,SOP,L} \leq A_i^{SOP} S_{ij}^{SOP} \quad (42)$$

$$P_{j,t}^{s,SOP,L} \leq A_j^{SOP} S_{ij}^{SOP} \quad (43)$$

再分别将式(35)、(40)、(41)进行松弛,得到:

$$(P_{ij,t}^s)^2 + (Q_{ij,t}^s)^2 \leq v_{i,t}^s \iota_{ij,t}^s \quad \forall ij \in \Omega_1 \quad (44)$$

$$(P_{i,t}^{s,SOP})^2 + (Q_{i,t}^{s,SOP})^2 \leq \left(\frac{P_{i,t}^{s,SOP,L}}{A_i^{SOP}} \right)^2 \quad (45)$$

$$(P_{j,t}^{s,SOP})^2 + (Q_{j,t}^{s,SOP})^2 \leq \left(\frac{P_{j,t}^{s,SOP,L}}{A_j^{SOP}} \right)^2 \quad (46)$$

经过松弛后,式(14)、(15)及式(44)~(46)具有相同的形式,如式(47)所示。

$$\alpha^2 + \beta^2 \leq \chi \rho \quad (47)$$

根据文献[10]中的多面体近似法,将形如式(47)所示的公式进行统一的线性化处理,则有:

$$\begin{cases} \xi^\omega \geq \alpha, & -\xi^\omega \leq \alpha \\ \mu^\omega \geq \beta, & -\mu^\omega \leq \beta \end{cases} \quad \omega = 0 \quad (48)$$

$$\begin{cases} \xi^\omega = \cos\left(\frac{\pi}{2^{\omega+1}}\right) \xi^{\omega-1} + \sin\left(\frac{\pi}{2^{\omega+1}}\right) \mu^{\omega-1} \\ \mu^\omega \geq -\sin\left(\frac{\pi}{2^{\omega+1}}\right) \xi^{\omega-1} + \cos\left(\frac{\pi}{2^{\omega+1}}\right) \mu^{\omega-1} \\ -\mu^\omega \leq -\sin\left(\frac{\pi}{2^{\omega+1}}\right) \xi^{\omega-1} + \cos\left(\frac{\pi}{2^{\omega+1}}\right) \mu^{\omega-1} \end{cases} \quad \omega = 1, 2, \dots, \kappa \quad (49)$$

$$\begin{cases} \xi^\omega \leq \frac{1}{2} (\chi + \rho) \\ \mu^\omega \leq \tan\left(\frac{\pi}{2^{\omega+1}}\right) \xi^\omega \end{cases} \quad \omega = \kappa \quad (50)$$

式中: ξ^ω 、 μ^ω 为线性化的中间变量; κ 为线性化次数。

通过上述方法将混合整数非线性规划模型转换为混合整数线性规划模型进行求解,求解效率更高,且通过调整线性化参数能得到较高的计算精度。

3.4 求解流程

本文所提DPV与SOP协调优化配置方法的求解流程如附录A图A2所示,具体步骤如下。

步骤1:典型日场景生成。对原始数据进行时序联合,构建24h源-荷时序相关场景。然后利用文献[24]的方法对源-荷联合时序场景进行缩减,如附录A图A2典型日场景选取框所示,具体步骤见文献[24]。

步骤2:建立DPV与SOP有功-无功协同优化配置模型。以DPV的准入容量最大为目标函数,以潮流约束、电压/电流约束、DPV约束、无功装置补偿约束、农网安全边界、SOP运行约束为约束条件,规划DPV容量与SOP位置/容量。

步骤3:对潮流约束、SOP约束进行二阶锥松弛并线性化,对其余约束条件进行线性化处理。

步骤4:采用优化求解器进行求解,获得DPV与SOP协调的优化配置方案。

为验证本文所提模型与方法的正确性和有效性,在GAMS软件中调用CPLEX进行求解。硬件环境为Intel® Core™ i7-10710U CPU,主频为1.1 GHz,内存为16 GB。

4 算例分析

以改进的我国某51节点农村配电网为例进行仿真分析,系统结构如附录A图A3所示,算例数据如附录A表A1和表A2所示。系统基准电压为10 kV,基准功率为1 MV·A。系统中总负荷为6875+j2440 kV·A,共有3条馈线。假设DPV接入位置为节点32、34、43、47;SOP待选位置为5个传统联络线位置;逆变器功率因数下限为0.9;SVC安装位置为节点14、48,可调范围为-500~500 kvar;SCB安装位置为节点9、31,共安装5组。根据历史数据统计获取该地一年负荷、光伏出力曲线,如附录A图A4所示。根据联合时序场景处理方式,将全年8760 h原始数据处理为365个源-荷联合时序场景,再根据3.4节所提流程聚类为9个典型日场景,如附录A图A5所示。

需要说明的是,本文重点分析配电网DPV准入容量和SOP位置/容量协同优化配置问题,未考虑负荷增长、配电变压器升级改造等。

4.1 线性化参数优化结果

本节通过修改式(48)~(50)中 κ 的取值,基于求解结果优化得到线性化参数 κ 的合理取值。此处仅考虑DPV与SOP协调规划,不考虑其他主动管理手段。线性化参数 κ 的取值(线性化次数)和DPV规划结果、计算时间的关系如图4所示。

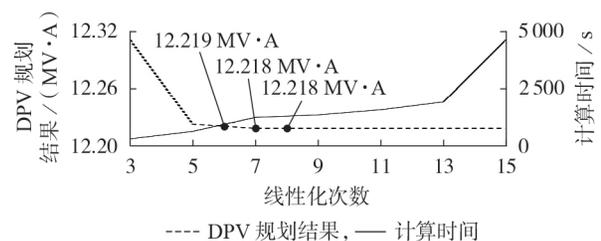


图4 线性化次数和DPV规划结果、计算时间的关系
Fig.4 Relationship between number of linearization and planning result, calculation time

从图4可以看出,线性化次数从3次增大到7次,其规划结果不断减小并逼近12.218 MV·A,且计算时间不断增加。若保留6位有效数字,线性化次数为9、11、13、15时的结果分别为12.218770、12.217976、

12.217968、12.217966、12.217966 MV·A。随着线性化次数不断增加,计算精度不断提高,而计算时间随线性化次数增加呈现指数增长。若保留 3 位有效数字,线性化次数近似为 6、7、8 时的规划结果分别为 12.219、12.218、12.218 MV·A,可见线性化次数近似为 7 次时的规划结果精度较高且计算速度较快。因此,本文选择线性化次数 $\kappa=7$ 。

4.2 DPV 准入容量优化结果

为考虑 SOP 安装的经济性,本节假设 SOP 的总安装容量不超过 1 MV·A。

1) 农网安全边界对 DPV 准入容量的影响。

本节主要研究农网安全边界对 DPV 准入容量的影响,优化配置结果如表 1、2 所示。由表可知,考虑农网安全边界的 DPV 最大准入容量结果略小于不考虑安全边界的,这是因为农网安全边界约束的加入缩小了原有数学模型的可行域。农网安全边界是考虑 $N-1$ 安全的约束,能够确保优化配置结果在全场景运行下电网都在安全运行范围内,相较于不考虑安全边界的模型,其求解结果更加准确可靠。此外,SOP 优化位置一致但容量配置略有不同,说明农网安全边界的加入对 SOP 的优化配置也具有一定的影响。

表 1 DPV 优化配置结果

Table 1 Optimal configuration results of DPV

| 有无农网安全边界 | DPV 准入容量 / (MV·A) | | | | 总容量 / (MV·A) |
|----------|-------------------|-------|-------|-------|--------------|
| | 节点 32 | 节点 34 | 节点 43 | 节点 47 | |
| 无 | 4.539 | 4.090 | 4.445 | 0.856 | 13.931 |
| 有 | 4.894 | 4.080 | 4.301 | 0.628 | 13.902 |

表 2 SOP 优化配置结果

Table 2 Optimal configuration results of SOP

| 有无农网安全边界 | 位置 | 容量 / (kV·A) | 总容量 / (kV·A) | |
|----------|----------|-------------|--------------|-------|
| | | | 节点 32 | 节点 34 |
| 无 | 线路 14-32 | 300 | 1000 | |
| | 线路 25-44 | 700 | | |
| 有 | 线路 14-32 | 600 | 1000 | |
| | 线路 25-44 | 400 | | |

将上述 2 种情况下计算得到的全场景节点电压与电压基准值进行比较,各个场景下所有节点的平均电压偏差如附录 A 图 A6 所示。不考虑农网安全边界时全场景下的各节点平均电压偏差为 0.686%,而考虑农网安全边界后各节点平均电压偏差为 0.679%。结果表明考虑农网安全边界有助于改善配电网电压分布,进一步表明考虑农网安全边界的有效性。

2) SOP / 无功补偿对 DPV 准入容量的影响。

为研究 SOP 以及主动管理措施对 DPV 准入容量提升的不同作用,本文设置如附录 A 表 A3 所示的 4 种算例进行对比分析,优化结果如表 3 所示。

由表 3 可知,算例 2—4 的 DPV 的准入容量均大

表 3 DPV 准入容量结果

Table 3 Hosting capacity results of DPV

| 算例 | DPV 准入容量 / (MV·A) | | | | 总容量 / (MV·A) |
|----|-------------------|-------|-------|-------|--------------|
| | 节点 32 | 节点 34 | 节点 43 | 节点 47 | |
| 1 | 4.182 | 2.493 | 1.730 | 0.677 | 9.082 |
| 2 | 4.182 | 4.080 | 3.828 | 0.586 | 12.675 |
| 3 | 4.402 | 3.124 | 3.913 | 0.761 | 12.218 |
| 4 | 4.894 | 4.080 | 4.301 | 0.628 | 13.902 |

于算例 1,说明主动管理措施以及 SOP 的接入可提高配电网对 DPV 的消纳能力。主动管理措施与 SOP 对 DPV 准入容量的提升作用接近,相对于算例 1 分别提升了 39.56% 和 34.53%,但主动管理措施中包括 SVC、SCB 以及 DPV 无功支撑等手段。相较于单一手段,SOP 对 DPV 准入容量的提升最为明显。算例 4 的优化结果最大,比算例 1 的结果提升了 53.07%,这表明多种措施相结合更有利于提升配电网对 DPV 的消纳能力。

算例 4 中 SOP 的全场景有功时序出力如附录 A 图 A7 所示。由图可知:为促进 DPV 电量消纳,SOP 上传输的有功功率在 24 h 内双向流动;当 SOP 两端有功传输功率为 0 时,可认为此时 SOP 处于关断状态。

4.3 SOP 安装容量上限对 DPV 准入容量灵敏度分析

为考察不同 SOP 安装容量上限对 DPV 最大准入容量的影响,进行 SOP 安装容量上限对 DPV 准入容量影响的灵敏度分析,DPV 优化配置结果如表 4 所示,SOP 配置结果如附录 A 表 A4 所示。

表 4 SOP 灵敏度分析

Table 4 Sensitivity analysis of SOP

| SOP 安装容量上限 / (kV·A) | DPV 准入容量 / (MV·A) | | | | 总容量 / (MV·A) |
|---------------------|-------------------|-------|-------|-------|--------------|
| | 节点 32 | 节点 34 | 节点 43 | 节点 47 | |
| 500 | 4.296 | 4.080 | 4.417 | 0.551 | 13.345 |
| 1000 | 4.894 | 4.080 | 4.301 | 0.628 | 13.902 |
| 1500 | 5.366 | 4.082 | 4.317 | 0.731 | 14.496 |
| 2000 | 6.088 | 4.080 | 4.191 | 0.737 | 15.097 |
| 2500 | 6.080 | 4.080 | 4.192 | 0.741 | 15.093 |

由表 4 和表 A4 分析可知,随着 SOP 安装容量上限的增大,配电网能够接纳 DPV 的能力也会随之增加,但并不能一直增加。当 SOP 的安装容量上限增加到 2 MV·A 之前,SOP 大多安装在线路 14-32 上,提升了馈线 II 节点 32、34 处的 DPV 准入容量,而线路 25-44 上 SOP 安装容量几乎没有变化,这是由于馈线 III 上原本就已经接入了大量 DPV,很难再提升其线路上的 DPV 准入容量。当 SOP 安装容量上限大于 2 MV·A 后,馈线 II 上的 DPV 消纳量已达上限,增加 SOP 安装容量上限(即增加 SOP 的投资成本)对提升配电网 DPV 准入容量几乎不起作用,此时限制 DPV 容量大小的因素是电压和馈线容量。

5 结论

针对高渗透率可再生能源消纳问题,本文提出基于安全边界和SOP协同配置的配电网DPV准入容量优化方法,提出考虑SOP优化运行、农网安全边界和主动管理策略的DPV与SOP有功-无功协同配置模型,并基于线性化近似将其转化为混合整数规划模型,通过改进某农网51节点系统进行算例分析,得到如下结论。

1)采用线性化近似后,求解精度随着线性化次数的增加而增加,但计算时间随线性化次数增加呈指数增长。综合考虑计算精度和时间,本文将线性化参数 κ 设置为7。

2)考虑农网的网损后,农网安全边界相比城网安全边界发生变化;农网安全边界会影响配电网DPV和SOP优化配置结果,且能够确保优化配置结果在全场景下电网都在安全运行范围内。

3)主动管理措施和SOP协同应用可大幅提高配电网DPV最大准入容量,SOP的提升效果相对其他主动管理措施效果更佳;当SOP安装容量上限达到一定程度后,限制DPV容量的因素是电压和馈线容量。

随着可再生能源渗透率的不断提高,配电网的不确定性将增大。此外,大量电力电子设备的接入也使配电系统变得越来越复杂。如何处理规划模型中的不确定性和复杂性,如何考虑负荷增长、配电变压器升级改造等进行配电网拓展规划是笔者下一步的研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] VERZIJLBERGH R A, DE VRIES L J, LUKSZO Z. Renewable energy sources and responsive demand. Do we need congestion management in the distribution grid?[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2119-2128.
- [2] 马鑫,田蓓,李宏强,等. 计及SNOP、DSTATCOM和B-DSTATCOM传输功率损耗及控制方式的柔性配电网状态估计[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 39-45.
MA Xin, TIAN Bei, LI Hongqiang, et al. State estimation of flexible distribution network considering power transmission loss and control modes of SNOP, DSTATCOM and B-DSTATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 39-45.
- [3] JI Haoran, WANG Chengshan, LI Peng, et al. An enhanced SOCP-based method for feeder load balancing using the multi-terminal soft open point in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2017, 208: 986-995.
- [4] 孙充勃,原凯,李鹏,等. 基于SOP的多电压等级混联配电网运行二阶锥规划方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1599-1605.
SUN Chongbo, YUAN Kai, LI Peng, et al. A second-order cone programming method for hybrid multiple voltage level distribution networks based on soft open points[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1599-1605.
- [5] JI H, WANG C, LI P, et al. Robust operation of soft open points in active distribution networks with high penetration of photovoltaic integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 280-289.
- [6] 王杨,向月,刘俊勇. 聚类网架拓扑与源荷关联场景生成下配电网分布式电源规划方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 49-56, 65.
WANG Yang, XIANG Yue, LIU Junyong. Distributed generator planning method in distribution network based on clustering network topology and source-load correlation scenarios [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 49-56, 65.
- [7] 卢光辉,滕欢,廖寒逊. 基于变量相关性特征聚类的多场景分布式电源规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(12): 95-101.
LU Guanghui, TENG Huan, LIAO Hanxun. Multi-scenario distributed generation planning based on clustering of variable correlation features[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(12): 95-101.
- [8] CHEN X, WU W, ZHANG B. Robust capacity assessment of distributed generation in unbalanced distribution networks incorporating ANM techniques[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 651-663.
- [9] 梁海深,李盛伟,白临泉,等. 基于SNOP的柔性配电网中分布式电源最大准入容量计算[J]. 电力建设, 2018, 39(8): 69-76.
LIANG Haishen, LI Shengwei, BAI Linqun, et al. Allowable DPV penetration capacity calculation of SNOP-based flexible distribution network[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(8): 69-76.
- [10] XIAO J, LI Y, QIAO X, et al. Enhancing hosting capacity of uncertain and correlated wind power in distribution network with ANM strategies[J]. IEEE Access, 2020, 8: 189115-189128.
- [11] 肖峻,张宝强,张苗苗,等. 配电网安全边界的产生机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5922-5932.
XIAO Jun, ZHANG Baoqiang, ZHANG Miaomiao, et al. The formation of distribution network security boundaries[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5922-5932.
- [12] 肖峻,贡晓旭,贺琪博,等. 智能配电网N-1安全边界拓扑性质及边界算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 545-554.
XIAO Jun, GONG Xiaoxu, HE Qibo, et al. Topological characteristics and algorithm of N-1 security boundary for smart distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 545-554.
- [13] 刘佳,程浩忠,徐谦,等. 安全距离理论下计及故障恢复的智能配电网随机规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 64-71.
LIU Jia, CHENG Haozhong, XU Qian, et al. Stochastic planning of smart distribution network based on security distance methodology considering fault recovery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 64-71.
- [14] 刘佳,徐谦,程浩忠,等. 考虑N-1安全的分布式电源多目标协调优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 84-92.
LIU Jia, XU Qian, CHENG Haozhong, et al. Multi-objective coordinated DG planning with N-1 security[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 84-92.
- [15] SHEN Zeyuan, SONG Wei, ZHAO Haibo, et al. Research on the influence of distributed generation on voltage in rural distribution network[C]//2020 2nd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST 2020). Guangzhou, China: EDP Sciences, 2021: 1-5.
- [16] XIAO J, ZU G, GONG X, et al. Observation of security region boundary for smart distribution grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1731-1738.
- [17] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed gene-

- ration penetration using soft normally-open points [C] // IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [18] 胡玉, 顾洁, 马睿, 等. 面向配电网弹性提升的智能软开关鲁棒优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 85-91.
HU Yu, GU Jie, MA Rui, et al. SNOP robust optimization for distribution network resilience enhancement [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 85-91.
- [19] TRUJILLO C L, VELASCO D, GUARNIZO J G, et al. Design and implementation of a VSC for interconnection with power grids, using the method of identification the system through state space for the calculation of controllers [J]. Applied Energy, 2011, 88(9): 3169-3175.
- [20] WANG Jian, ZHOU Niancheng, CHUNG C Y, et al. Coordinated planning of converter-based dg units and soft open points incorporating active management in unbalanced distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 2015-2027.
- [21] 何英静, 沈舒仪, 何东, 等. 兼顾网损优化效益与投资成本的SNOP容量规划方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 32-40.
HE Yingjing, SHEN Shuyi, HE Dong, et al. A SNOP capacity planning method considering network-loss optimization benefit and investment cost [J]. Electric Power, 2020, 53(4): 32-40.
- [22] DING Tao, LI Fangxing, LI Xue, et al. Interval radial power flow using extended DistFlow formulation and Krawczyk iteration method with sparse approximate inverse preconditioner [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(14): 1998-2006.
- [23] ZHAO T, CHEN B, ZHAO S, et al. A flexible operation of distributed generation in distribution networks with dynamic boundaries [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 4127-4130.
- [24] 宋军英, 崔益伟, 李欣然, 等. 基于欧氏动态时间弯曲距离与熵权法的负荷曲线聚类方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 87-94.
SONG Junying, CUI Yiwei, LI Xinran, et al. Load curve clustering method based on Euclidean dynamic time warping distance and entropy weight [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 87-94.

作者简介:



姚天宇

姚天宇(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划与优化运行 (E-mail: yty190900661@hnu.edu.cn);

李勇(1982—),男,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为能源/电力系统优化运行与控制、电能变换系统与装备 (E-mail: yongli@hnu.edu.cn);

乔学博(1992—),男,博士研究生,主要研究方向为配电网规划与优化运行 (E-mail: xbq1992@hnu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Hosting capacity optimization of distributed photovoltaic in distribution network considering security boundary and coordinate configuration of SOP

YAO Tianyu¹, LI Yong¹, QIAO Xuebo¹, HAN Yu^{1,2}, JIAO Shumei¹, CAO Yijia¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Jiangsu Xudian Construction Group Co., Ltd., Xuzhou 210009, China)

Abstract: SOP (Soft Open Point) provides new ideas for the consumption of high penetration of photovoltaic in distribution network, so the security boundary of rural network is incorporated into the planning model of distribution network to optimize and research the hosting capacity of DPV (Distributed PhotoVoltaic). The improved security boundary model considering the loss of the rural network is derived and analyzed, and its linear expression is proposed. The SOP principle is explained and the mathematical model is built for distribution network planning. Then, taking the maximum of DPV hosting capacity as the objective, the active-reactive power coordinated optimal model of DPV and SOP considering the improved security boundary and active management measures is proposed. Meanwhile, SOP and other parts in this model are linearized by introducing linear approximation, so the original model is transformed into a mixed integer linear programming model, and GAMS is used to solve the optimal problem. Finally, case studies are carried out on a 51-bus rural network to illustrate the effectiveness and correctness of the proposed model and method, and the impacts of security boundary, active management measures and SOP capacity on the maximum hosting capacity of DPV are analyzed.

Key words: high penetration of photovoltaic; distributed power generation; rural network; security boundary; linearization; hosting capacity; soft open point

附录 A

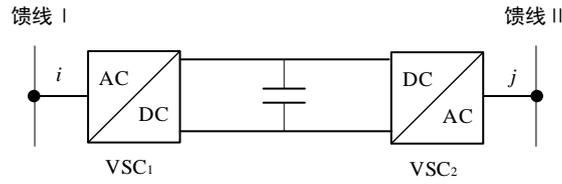


图 A1 背靠背电压源型 SOP
Fig.A1 SOP of back-to-back voltage source type

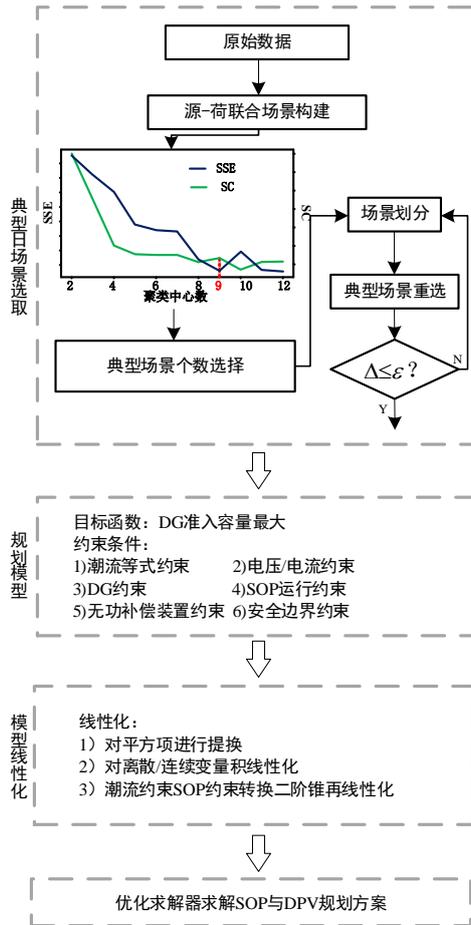


图 A2 求解流程图
Fig.A2 Solution flowchart

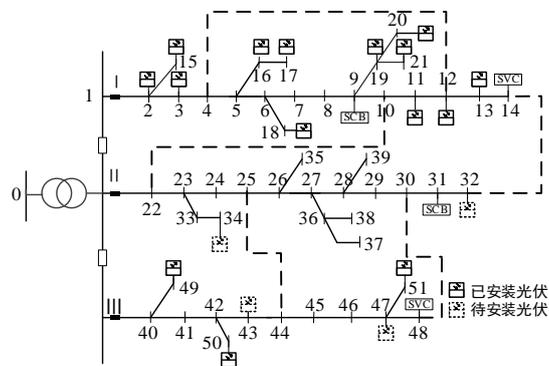


图 A3 改进 51 农网算例
Fig.A3 Improved 51 rural grid

表 A1 51 节点算例参数
Table A1 Network parameters of 51 nodes

| 线路 | 线路首端 | 线路末端 | 线路电阻/ Ω | 线路电抗/ Ω | 允许载流量/A | 尾节点所带 负荷/(kV · A) |
|-----|------|------|----------------|----------------|---------|----------------------|
| 11 | 0 | 1 | 0.008434 | 0.492266 | 500 | 245+j40 |
| 12 | 1 | 2 | 0.47242 | 0.444691 | 265 | 0 |
| 13 | 2 | 3 | 0.41814 | 0.393597 | 265 | 140+j47 |
| 14 | 3 | 4 | 0.368 | 0.3464 | 265 | 0 |
| 15 | 4 | 5 | 0.49588 | 0.466774 | 265 | 140+j66 |
| 16 | 5 | 6 | 0.3772 | 0.35506 | 265 | 70+j30 |
| 17 | 6 | 7 | 0.506 | 0.4763 | 265 | 35+j15 |
| 18 | 7 | 8 | 0.34592 | 0.325616 | 265 | 70+j10 |
| 19 | 8 | 9 | 0.3749 | 0.352895 | 265 | 70+j27 |
| 110 | 9 | 10 | 0.32844 | 0.309162 | 265 | 320+j105 |
| 111 | 10 | 11 | 0.32568 | 0.306564 | 265 | 0 |
| 112 | 11 | 12 | 0.45908 | 0.432134 | 265 | 175+j60 |
| 113 | 12 | 13 | 0.48576 | 0.457248 | 265 | 0 |
| 114 | 13 | 14 | 0.52072 | 0.490156 | 265 | 140+j62 |
| 115 | 2 | 15 | 0.33488 | 0.315224 | 265 | 140+j43 |
| 116 | 5 | 16 | 0.35696 | 0.336008 | 265 | 70+j20 |
| 117 | 16 | 17 | 0.24012 | 0.226026 | 265 | 70+j12 |
| 118 | 6 | 18 | 0.4186 | 0.39403 | 265 | 70+j10 |
| 119 | 9 | 19 | 0.4577 | 0.430835 | 265 | 245+j56 |
| 120 | 19 | 20 | 0.4163 | 0.391865 | 265 | 105+j48 |
| 121 | 19 | 21 | 0.39974 | 0.376277 | 265 | 105+j40 |
| 122 | 1 | 22 | 0.47242 | 0.444691 | 265 | 0 |
| 123 | 22 | 23 | 0.3588 | 0.33774 | 265 | 35+j14 |
| 124 | 23 | 24 | 0.45448 | 0.427804 | 265 | 35+j10 |
| 125 | 24 | 25 | 0.4784 | 0.45032 | 265 | 0 |
| 126 | 25 | 26 | 0.52486 | 0.494053 | 265 | 70+j21 |
| 127 | 26 | 27 | 0.43608 | 0.410484 | 265 | 0 |
| 128 | 27 | 28 | 0.3956 | 0.37238 | 265 | 35+j10 |
| 129 | 28 | 29 | 0.33396 | 0.314358 | 265 | 70+j30 |
| 130 | 29 | 30 | 0.24518 | 0.230789 | 265 | 140+j50 |
| 131 | 30 | 31 | 0.38686 | 0.364153 | 265 | 140+j66 |
| 132 | 31 | 32 | 0.42688 | 0.401824 | 265 | 640+j245 |
| 133 | 23 | 33 | 0.5382 | 0.50661 | 265 | 140+j42 |
| 134 | 33 | 34 | 0.4692 | 0.44166 | 265 | 35+j14 |
| 135 | 26 | 35 | 0.48438 | 0.455949 | 265 | 210+j21 |
| 136 | 27 | 36 | 0.37214 | 0.350297 | 265 | 35+j6 |
| 137 | 36 | 37 | 0.51244 | 0.482362 | 265 | 70+j7 |
| 138 | 36 | 38 | 0.30452 | 0.286646 | 265 | 140+j62 |
| 139 | 28 | 39 | 0.35466 | 0.333843 | 265 | 280+j133 |
| 140 | 1 | 40 | 0.47242 | 0.444691 | 320 | 140+j55 |
| 141 | 40 | 41 | 0.21813 | 0.25118 | 320 | 0 |
| 142 | 41 | 42 | 0.13464 | 0.15504 | 320 | 210+j40 |
| 143 | 42 | 43 | 0.17028 | 0.19608 | 320 | 140+j30 |
| 144 | 43 | 44 | 0.35409 | 0.40774 | 320 | 280+j130 |
| 145 | 44 | 45 | 0.22341 | 0.25726 | 320 | 140+j67 |
| 146 | 45 | 46 | 0.28611 | 0.32946 | 320 | 480+j222 |
| 147 | 46 | 47 | 0.24618 | 0.28348 | 320 | 70+j15 |
| 148 | 46 | 48 | 0.34782 | 0.40052 | 320 | 210+j48 |
| 149 | 40 | 49 | 0.16203 | 0.18658 | 320 | 280+j115 |
| 150 | 42 | 50 | 0.16764 | 0.19304 | 320 | 640+j296 |
| 151 | 47 | 51 | 0.37983 | 0.43738 | 320 | 245+j40 |

表 A2 各馈线参数
Table A2 Parameters of each feeder

| 线路 | 配变容量/(kV · A) | 负荷容量/kW | 分布式电源容量/kW | 渗透率/% |
|-------|---------------|---------|------------|-------|
| 线路 I | 2950 | 2105 | 1200 | 57.01 |
| 线路 II | 2600 | 1900 | 0 | 0 |
| 线路 II | 3900 | 2870 | 1500 | 52.26 |
| 总计 | 9450 | 6875 | 2700 | 39.27 |

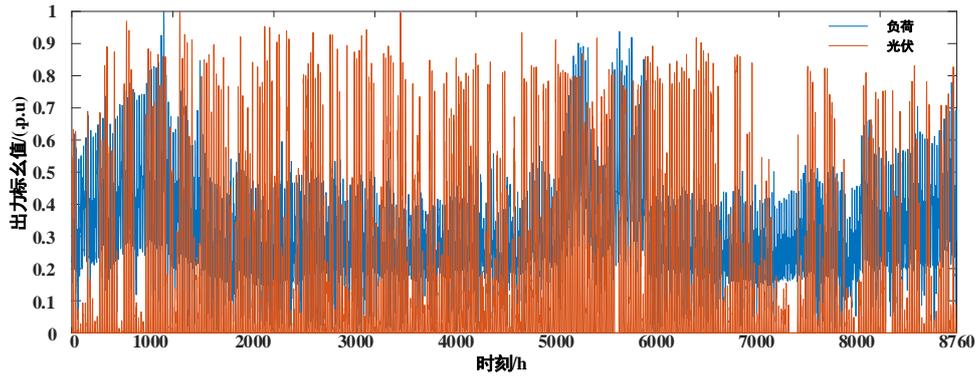


图 A4 某地一年历史数据

Fig.A4 One year's historical data of a certain place

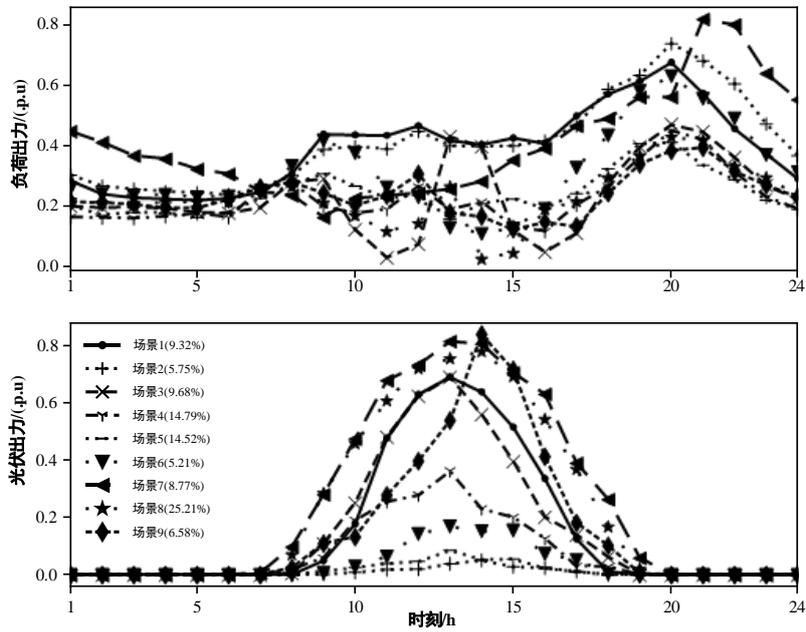


图 A5 DTW 动态时间联合聚类场景

Fig.A5 DTW dynamic time joint clustering scene

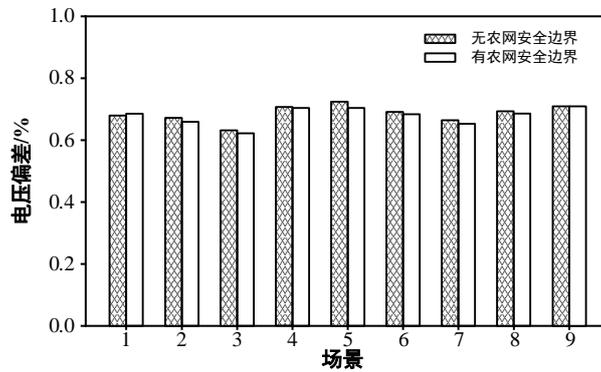


图 A6 全场景电压平均偏差

Fig.A6 Average voltage deviation of whole scene

表 A3 各提升措施的不同组合
Table A3 Different combinations of measures

| 算例 | 主动管理手段 | SOP 协同规划 |
|----|--------|----------|
| 1 | — | — |
| 2 | √ | — |
| 3 | — | √ |
| 4 | √ | √ |

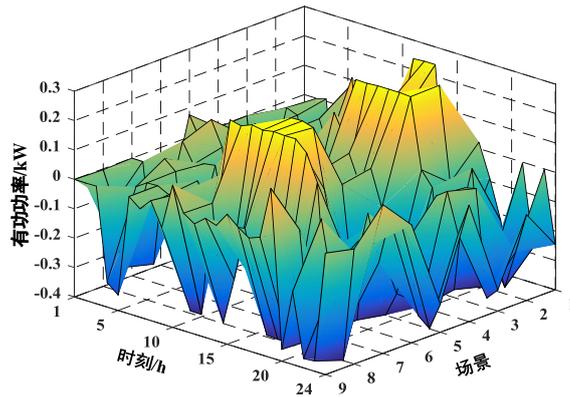


图 A7 SOP 全场景有功时序出力
Fig.A7 Whole scene active power of SOP

表 A4 SOP 规划结果
Table A4 SOP configuration results

| SOP 上限/(kV · A) | SOP 安装位置、容量 | | | |
|-----------------|-------------|-------------|----------|-------------|
| | 位置 | 容量/(kV · A) | 位置 | 容量/(kV · A) |
| 500 | | 100 | | 400 |
| 1000 | | 600 | | 400 |
| 1500 | 线路 14-32 | 1000 | 线路 25-44 | 500 |
| 2000 | | 1600 | | 400 |
| 2500 | | 1600 | | 900 |