

计及经济性的交直流配电网演进规划方法研究

杨乐¹,朱莹¹,黄河²,王惟¹,蒋玮³,苏晓云³

(1. 国网江苏泰州供电公司,江苏 泰州 225300;
2. 国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 210024;
3. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210018)

摘要:在我国,随着光伏、风电等新能源和直流负荷在电力系统中占比的持续增长,交直流混合配电网已逐步成为配电网发展的一种主流趋势。然而已有的配电网形态评估体系已不再适用交直流混合配电网,且现有的配电网规划策略未整体考虑演进过程中配电网多阶段规划的关联性。因此,研究了考虑经济性的交直流混合配电网演进规划方法。首先,针对传统配电网形态评价体系不再适用交直流混合配电网的现状,提出了基于改进的灰色聚类-指标权重确定(CRITIC)组合赋权法。在此基础上,进一步构建了基于序贯二阶锥(SSOCP)框架的多阶段演进模型,以优化混合配电网的多阶段演进方案。最后,通过算例验证了所提方法的可行性和优越性。

关键词:交直流混合配电网;演进规划;改进的灰色聚类-指标权重确定组合赋权法;序贯二阶锥

中图分类号:TM74 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25860

Study on the Evolutionary Planning Method of AC/DC Distribution Network with Economy

YANG Le¹, ZHU Ying¹, HUANG He², WANG Wei¹, JIANG Wei³, SU Xiaoyun³

(1. State Grid Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, Jiangsu, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Supply Company, Nanjing 210024, Jiangsu, China; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, Jiangsu, China)

Abstract: In China, the ascendancy of new energy sources such as photovoltaic and wind power, alongside the proliferation of DC loads within the power system, has propelled hybrid AC/DC distribution networks to the forefront of power distribution system evolution. However, the extant assessment framework for distribution network configurations is inadequate for hybrid AC/DC systems, and prevailing planning strategies overlook the interconnectedness of multi-stage network evolution. Consequently, an evolutionary planning methodology for AC/DC hybrid distribution networks with an emphasis on economic considerations was extensively studied. Initially, addressing the incongruity of the conventional distribution network assessment system with hybrid setups, an enhanced grey clustering-criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) amalgamation technique was advocated. Subsequently, leveraging this framework, a multi-stage evolution model anchored in the sequential second-order cone programming (SSOCP) paradigm was developed to refine the multi-stage evolutionary trajectory of hybrid distribution networks. Ultimately, through illustrative examples, the efficacy and primacy of this approach were substantiated.

Key words: hybrid AC/DC distribution networks; evolutionary planning; improved grey clustering-criteria importance through intercriteria correlation; sequential second-order cone programming (SSOCP)

随着我国“双碳”目标的推进,分布式能源已经成为能源结构转型的重要力量。伴随着电力电子技术的进步,电动汽车充电设施、直流园区等直流负荷对配电网的直流接入需求日益增

长^[1]。传统配电网向交直流混合配电网演进是我国未来配电网发展的重要趋势。

在交直流混合配电网演进的过程中,需要决策混合配电网的拓扑结构、交流与直流电源及负

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022100)

作者简介:杨乐(1981—),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为交直流配电网规划,Email: 1097574877@qq.com

载的接入位置等^[2]。然而, 现行的配电网评估体系主要针对传统的交流配电网设计, 并未充分涵盖直流电源和负载接入所带来的新元素和特性, 导致其不再完全适用于新兴的交直流混合配电网。我国虽然已有电网智能化发展评估指标体系^[3], 但未考虑混合配电网演进建设的经济性。因此亟需新的评估体系以适应混合配电网的新特性^[4]。

在配电网规划的研究中, 传统的规划思路通常局限于分阶段为未来的某个特定时期设计单一的电网架构。这种方法没有综合考虑到交直流混合配电网多阶段演进的联系性。文献[5]探讨了一种多阶段、多微电网群随机规划方法, 该方法考虑了储能等资源在微电网群内的多阶段配置。但该研究只考虑了对电源的扩容规划。文献[6]提出了遗传算法与根节点融合技术来规划分布式能源的选址和混合配电网的扩展, 但未考虑交直流电网中的电能转换设备规划。文献[7]在交直流系统中提出了一个多目标规划模型, 但随着复杂度的上升, 模型求解较为困难。文献[8]基于复杂网络理论, 提出了一种增强混合配电网灵活性的规划方法, 但因基于一定的假设条件而具有应用的局限性。目前的方法只单独考虑各阶段的规划方案, 未综合考虑演进规划多阶段的关系。

基于交直流混合配电网演进发展的现状, 本文提出了一种计及经济性的交直流配电系统演进规划方法。首先建立了基于改进的灰色聚类-指标权重确定法(criteria importance through inter-criteria correlation, CRITIC)对评价体系指标进行组合赋权。其次, 构建了基于序贯二阶锥(sequential second-order cone programming, SSOCP)的交直流混合配电网多阶段演进规划模型, 综合考虑配网多阶段演进规划的联系性, 通过SSOCP框架收紧原本优化中松弛的可行域, 提高求解的精确性。最后, 在交直流混合系统算例中验证了本文方法的可行性与优越性。

1 交直流配电网形态演进形态评估体系

我国电力系统正处于的变革导致传统的配电网评估方法不足以精确地评价交直流混合配电网的性能。因此, 本文提出了一种改进的灰色聚类-CRITIC组合赋权技术。

1.1 评价体系指标建立

本方法旨在为混合电网的多阶段演进规划提供决策指导^[9]。该体系选取以下9个评价指标:

1) 系统电压偏差 ΔV , 计算如下:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n |\frac{U_i - U_N}{U_N}| / n \quad (1)$$

式中: U_N 、 U_i 分别为额定电压和节点 i 的实际电压; n 为系统总节点数。

2) 直流负荷网供效率 σ , 计算如下:

$$\sigma = \frac{P_{dl}}{P_{al}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_{dl} 为最大直流负荷; P_{al} 为年最大负荷。

3) 新能源消纳率 ξ_{con} , 计算如下:

$$\xi_{con} = \frac{\sum_{t=1}^T E_{res}(t)}{E_{res}^{tot}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E_{res} 为消纳的新能源电量; E_{res}^{tot} 为理论发电量。

4) 线路建设费用 C_{con} , 涵盖线路及换流器的投资费用, 计算如下:

$$C_{con} = C_{dcl} + C_{acl} + C_{vsc} \quad (4)$$

其中

$$C_{dcl} = l_{dc} \times (\alpha_{li} + \beta_{li}) \times c_{dcl} \quad (5)$$

$$C_{acl} = l_{ac} \times (\alpha_{li} + \beta_{li}) \times c_{acl} \quad (6)$$

$$C_{vsc} = \sum_{m=1}^{n_{vsc}} (\alpha_{vsc} + \beta_{vsc}) C_{vscm} S_{vscm} \quad (7)$$

式中: C_{acl} 、 C_{dcl} 、 C_{vsc} 分别为交、直流线路及换流器费用; l_{ac} 、 l_{dc} 分别为交、直流线路长度; c_{acl} 、 c_{dcl} 分别为交、直流线路单位投资成本; α_l 为线路投资年均费用系数; β_l 为线路年维护费用系数; n_{vsc} 为换流器编号; α_{vsc} 、 β_{vsc} 分别为换流器固定投资及年维护费用系数; C_{vscm} 、 S_{vscm} 分别为第 m 个换流器的投资费用和容量。

5) 线路网损费用 C_{loss} , 计算如下:

$$C_{loss} = p(P_{acloss,ij} + P_{dcloss,mn}) \quad (8)$$

其中

$$P_{acloss,ij} = [(U_i)^2 + (U_j)^2 - 2U_i U_j \cos\delta_{ij}] G_{ij} \quad (9)$$

$$P_{dcloss,mn} = (\frac{P_{dcm}}{U_{dm}})^2 R_{dmn} \quad (10)$$

式中: $P_{acloss,ij}$ 、 $P_{dcloss,mn}$ 分别为交、直流网损; p 为电价; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值; δ_{ij} 为节点 i 和 j 之间的电压相位差; G_{ij} 为节点 i 和 j 间的电导; P_{dcm} 、 U_{dm} 分别为换流器 m 的注入功率和直流侧电压; R_{dmn} 为换流器 m 、 n 间的直流电阻。

6) 换流器损耗费用 $C_{vscloss}$, 计算如下:

$$\begin{aligned} C_{\text{vscloss}} &= pP_{\text{vscloss},n} \\ &= p \left(\sum_{m=1}^{n_{\text{vsc}}} I_m R_m + \sum_{m=1}^{n_{\text{vsc}}} 0.5 C_m V_m f_{m,\text{sw}} \right) \quad (11) \end{aligned}$$

式中: I_m 为换流器 m 的电流; R_m 为换流器 m 的导通电阻; C_m 为换流器 m 的输出电容; V_m 为换流器 m 的电压; $f_{m,\text{sw}}$ 为换流器 m 的开关频率。

7)预期缺供电量(EENS)是指一年内因系统故障引起的缺供电量。 t 时刻的系统EENS(S_t^{EENS})和单个元件EENS($I_{l,t}^{\text{EENS}}$)计算如下:

$$S_t^{\text{EENS}} = \sum_{l \in \Pi} I_{l,t}^{\text{EENS}} \quad \forall t \in NT \quad (12)$$

$$\begin{cases} |I_{l,t}^{\text{EENS}} - \lambda_l \tau_l P_{l,t}^{\text{lack}}| \leq C(1 - \alpha_{l,t}) & \forall l \in \Pi, \forall t \in NT \\ I_{l,t}^{\text{EENS}} \leq C \alpha_{l,t} & \forall l \in \Pi, \forall t \in NT \end{cases} \quad (13)$$

式中: t 为计划周期的时刻; l 为线路编号; Π 为系统中线路的集合; λ_l 为线路 l 的故障率; τ_l 为该线路 l 的故障修复时间; $P_{l,t}^{\text{lack}}$ 为 t 时刻支路 l 故障引起的功率缺额; $\alpha_{l,t}$ 为线路是否连接的二元变量,线路连接则为1,否则为0; C 为常数。

8)系统平均停电频率(SAIFI)为系统用户一年内的平均停电次数。系统的SAIFI(S_t^{SAIFI})和元件的SAIFI($I_{l,t}^{\text{SAIFI}}$)由下式计算:

$$S_t^{\text{SAIFI}} = \frac{\sum_{l \in \Pi} I_{l,t}^{\text{SAIFI}}}{\sum_{i \in \Omega} N_{i,t}} \quad \forall t \in NT \quad (14)$$

$$|I_{l,t}^{\text{SAIFI}} - \lambda_l N_{l,t}^{\text{ADU}}| \leq C(1 - \alpha_{l,t}) \quad \forall l \in \Pi, \forall t \in NT \quad (15)$$

式中: $N_{i,t}$ 为时间 t 时节点 i 的等效用户数; $N_{l,t}^{\text{ADU}}$ 为因支路 l 故障受影响的下游用户数量。

9)系统平均停电时间(SAIDI)为系统用户一年内的平均停电持续时间。类似的,系统整体的SAIDI(S_t^{SAIDI})和单个元件的SAIDI($I_{l,t}^{\text{SAIDI}}$)可由下式计算:

$$S_t^{\text{SAIDI}} = \frac{\sum_{l \in \Pi} I_{l,t}^{\text{SAIDI}}}{\sum_{i \in \Omega} N_{i,t}} \quad \forall t \in NT \quad (16)$$

$$|I_{l,t}^{\text{SAIDI}} - \lambda_l \tau_l N_{l,t}^{\text{ADU}}| \leq C(1 - \alpha_{l,t}) \quad \forall l \in \Pi, \forall t \in NT \quad (17)$$

1.2 改进的灰色聚类-CRITIC组合赋权法

考虑到主客观赋权方法特点,本文提出了基于改进的灰色聚类-CRITIC组合赋权法。

灰色聚类法的核心在于利用变量间的相关性进行聚类分析,下面介绍具体的计算步骤。

将 K 位专家分为 q 类,专家 k 所在类内共 α_k 人,则专家 k 的类间权重为

$$\lambda_k = \frac{\alpha_k^2}{\sum_{k=1}^q \alpha_k^2} \quad (18)$$

专家的排序向量为 s_h^k ,类内权重 μ_k 为

$$\mu_k = \frac{1 + \frac{1}{\ln M} \sum_{h=1}^M (s_h^k \ln s_h^k)}{\sum_{k=1}^{\alpha_k} [1 + \frac{1}{\ln M} \sum_{h=1}^M (s_h^k \ln s_h^k)]} \quad (19)$$

专家 k 的总权重 γ_k 为

$$\gamma_k = \lambda_k \mu_k \quad (20)$$

因此,灰色聚类主观权重向量矩阵 ρ 为

$$\rho = [\rho_1 \rho_2 \cdots \rho_M]^T = \begin{bmatrix} s_1^1 & s_1^2 & \cdots & s_1^K \\ s_2^1 & s_2^2 & \cdots & s_2^K \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_M^1 & s_M^2 & \cdots & s_M^K \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_K \end{bmatrix} \quad (21)$$

本文还使用了一种客观权重赋权法——改进的指标权重确定法^[10]。假设 x_{gh} 是第 g 个方案的第 h 个指标评分,共 N 组方案,每组方案含 M 个评价指标。本文提出的改进的CRITIC法计算如下:

首先,计算指标 h 的冲突值 R_h :

$$R_h = \sum_{g=1}^N (1 - r_{gh}) \quad h = 1, 2, \dots, M \quad (22)$$

式中: r_{gh} 为不同指标间的Pearson相关系数。

在处理指标信息量时,本文改进了传统方法中对冲突值的处理,对其进行归一化处理:

$$I_h = \sigma_h R_h = \frac{\sigma_h}{x_h} / \sum_{g=1}^N (1 - |r_{gh}|) \quad h = 1, 2, \dots, M \quad (23)$$

式中: σ_h 为指标 h 的标准差。

因此,改进的CRITIC法权重向量 \mathbf{o}_h 为

$$\mathbf{o}_h = \frac{I_h}{\sum_{h=1}^M I_h} \quad (24)$$

采用拉格朗日乘子法获得组合赋权 A_h :

$$A_h = \frac{\sqrt{\rho_h \mathbf{o}_h}}{\sum_{h=1}^M \sqrt{\rho_h \mathbf{o}_h}} \quad (25)$$

2 交直流混合配电网序贯二阶锥松弛规划模型

传统的二阶锥规划可以求解交直流混合配电网优化的非凸非线性问题。但是,二阶锥松弛

的模型与全局最优解之间仍有差距。松弛后的约束可能造成模型运行条件的不准确。鉴于此, 本研究运用序贯二阶锥框架, 以提高规划结果的准确性和可行性^[11]。

假设二阶锥约束为

$$y^2 - x^2 \leq 0 \quad (26)$$

引入广义非凸约束:

$$x^2 - y^2 \leq 0 \quad (27)$$

针对式(27)中的变量 y , 采用泰勒一阶近似对其展开:

$$x^2 - [\hat{y}_k^2 + 2\hat{y}_k \cdot (y - \hat{y}_k)] \leq 0 \quad (28)$$

式中: \hat{y}_k 为变量 y 的第 k 次迭代值。

整理得到 $x^2 \leq 2\hat{y}_k y - \hat{y}_k^2$, 并且设 $a = 2\hat{y}_k$, $b = -\hat{y}_k^2$, 则有:

$$x^2 \leq ay + b \quad (29)$$

将式(29)进一步整理为标准二阶锥形式:

$$x^2 + (y - c_1)^2 \leq (y + c_2)^2 \quad (30)$$

其中

$$c_1 = \frac{a^2 + 4b}{4a} \quad c_2 = \frac{a^2 - 4b}{4a}$$

此外, 式(27)还可以处理多个 y 变量。类似地, 引入松弛因子 Γ , 则有:

$$x^2 \leq a_1 y_1 + a_2 y_2 + b + \Gamma \quad (31)$$

通过 SSOCP 方法, 原问题被转换为二阶锥约束形式。

3 交直流混合配网多阶段演进模型建立

传统的配电网规划通常只考虑单一时间点下的最佳拓扑结构。然而, 单一拓扑已无法满足未来电力系统的需求。此外, 需整体考虑交直流混合配电网演进各阶段规划的联系性。

本文在已知未来多阶段直流源荷渗透率结果的基础上, 基于 SSOCP 框架提出了一种综合考虑交直流配网多阶段演进规划优化方法。该方法充分考虑了不同阶段间的相互关联, 优化交直流配电网的多阶段演进策略, 并将紧约束纳入模型中, 从而提升模型求解的收敛性和精确度。

3.1 目标函数

交直流混合配电网的多阶段演进规划模型中充分考虑了建设的经济性, 以交直流系统综合效益最大与建设成本综合最小为目标函数:

$$\max \sum_{t=1}^{NT} (-\gamma \cdot \Gamma + \sum_{h=1}^M w_h S_h) \quad (32)$$

式中: t 为当前规划的阶段; NT 为总规划阶段数; h 为评价指标序号; M 为总评价指标数; w_h 为第 h 个评价指标的权重系数; S_h 为第 h 个评价指标的值; Γ 为非负的松弛因子; γ 为惩罚因子。

在目标函数中, 引入惩罚项 $\gamma \cdot \Gamma$ 以收紧松弛因子, 设定惩罚因子 γ 的初始值较小, 随着迭代非负的松弛因子 Γ 减小为 0。

3.2 约束条件

1) 交直流潮流约束。在交流潮流计算中, 潮流方程如下式所示:

$$\begin{cases} P_{ij,t}^L = \sqrt{2} G_l u_{l,t}^i + G_l r_{l,t} + B_l w_{l,t} & \forall t \in NT \\ Q_{ij,t}^L = \sqrt{2} (B_l + \frac{B_l^{sh}}{2}) u_{l,t}^i - B_l r_{l,t} + G_l r_{l,t} & \forall t \in NT \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{inj}} = \sum_{l \in \Pi} P_{l,t} + P_{i,t}^D & \forall t \in NT \\ Q_{i,t}^{\text{inj}} = \sum_{l \in \Pi} Q_{l,t} + Q_{i,t}^D & \forall t \in NT \end{cases} \quad (34)$$

其中

$$u_{l,t}^i = U_{i,t}^2 / \sqrt{2}$$

$$r_{l,t} = U_{i,t} U_{j,t} \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})$$

$$w_{l,t} = U_{i,t} U_{j,t} \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})$$

式中: $P_{ij,t}^L$, $Q_{ij,t}^L$ 分别为 t 阶段从节点 i 到节点 j 的有功、无功功率; G_l , B_l , B_l^{sh} 分别为线路 l 的电导、电纳和并联电纳; $U_{i,t}$, $U_{j,t}$, $\theta_{i,t}$, $\theta_{j,t}$ 分别为 t 阶段节点 i , j 处的电压幅值和相角; $P_{i,t}^{\text{inj}}$, $Q_{i,t}^{\text{inj}}$ 分别为 t 阶段注入节点 i 的有功、无功功率; $P_{i,t}^D$, $Q_{i,t}^D$ 分别为 t 阶段节点 i 的有功、无功负荷; $P_{l,t}$, $Q_{l,t}$ 分别为支路 l 末端的有功、无功功率; Π 为系统中线路的集合。

在直流潮流计算中, 潮流方程为

$$P_{ij,t}^L = \sqrt{2} G_l u_{l,t}^i + G_l r_{l,t} \quad \forall t \in NT \quad (35)$$

2) 配电网运行安全约束如下:

$$V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \quad \forall t \in NT \quad (36)$$

式中: $V_{i,\min}$, $V_{i,\max}$ 分别为节点 i 的电压最小、最大值。

3) 辅助变量约束。辅助变量 $\alpha_{l,t}$, $u_{l,t}^i$ 处理线路建设状态对端电压的影响:

$$0 \leq u_{l,t}^i \leq \frac{V_{i,\max}^2}{\sqrt{2}} \alpha_{l,t} \quad \forall t \in NT \quad (37)$$

$$u_t^i - u_{l,t}^i \leq \frac{V_{i,\max}^2}{\sqrt{2}} (1 - \alpha_{l,t}) \quad \forall t \in NT \quad (38)$$

$$0 \leq r_{l,t} \leq V_{i,\max} V_{j,\max} \quad \forall t \in NT \quad (39)$$

$$-V_{i,\max} V_{j,\max} \leq w_{l,t} \leq V_{i,\max} V_{j,\max} \quad \forall t \in NT \quad (40)$$

$$\frac{V_{i,\min}^2}{\sqrt{2}} \leq u_t^i \leq \frac{V_{i,\max}^2}{\sqrt{2}} \quad \forall t \in NT \quad (41)$$

$$\begin{cases} u_{l,t}^i \geq 0 & \forall t \in NT \\ u_{l,t}^j \geq 0 \end{cases} \quad (42)$$

$$r_{l,t}^2 + w_{l,t}^2 \leq 2u_{l,t}^i u_{l,t}^j \quad \forall t \in NT \quad (43)$$

其中, $u_t^i = (V_{l,t})^2 / \sqrt{2}$, 若线路 l 未建, 则 $u_{l,t}^i = u_t^i$, 否则为 0; $\alpha_{l,t}$ 为线路是否连接的二元变量, 线路连接则为 1, 否则为 0。

4) SSOCP 约束。首先添加等价于 $r_{l,t}^2 + w_{l,t}^2 \geq 2u_{l,t}^i u_{l,t}^j$ 的非凸约束:

$$(\sqrt{2} r_{l,t})^2 + (\sqrt{2} w_{l,t})^2 + (u_{l,t}^i - u_{l,t}^j)^2 \geq (u_{l,t}^i + u_{l,t}^j)^2 \quad \forall t \in NT \quad (44)$$

根据式(26)~式(31), 添加松弛因子, 得到:

$$(\sqrt{2} r_{l,t})^2 + (\sqrt{2} w_{l,t})^2 + (u_{l,t}^i - u_{l,t}^j)^2 + \Gamma_t^u \geq (u_{l,t}^i + u_{l,t}^j)^2 \quad \forall t \in NT \quad (45)$$

5) 新建负荷节点、线路约束。

用 $load_{b,t}$ 表示节点建设情况。其中 $load_{b,t}=1$ 表示交直流混合配电网中建设该节点, 否则为 0, 计算公式如下:

$$load_{b,t} = \begin{cases} e_{-b_{b,t}} & t = 1, \forall t \in NT \\ e_{-b_{b,t}} - e_{-b_{b,t-1}} & t \geq 2, \forall t \in NT \end{cases} \quad (46)$$

$$e_{-b_{b,t}} - e_{-b_{b,t-1}} \geq 0 \quad 2 \leq t \leq T \quad (47)$$

其中, $e_{-b_{b,t}}$ 是节点 b 在 t 时刻的建设状况, 若为 1 则表示连接到交直流混合配电网, 否则为 0。

用 $line_{l,t}$ 表示线路演进, 其中 $line_{l,t}=1$ 表示交直流混合配电网中建设该线路, 否则为 0, 计算公式如下:

$$line_{l,t} = \begin{cases} e_{-l_{l,t}} & t = 1, \forall t \in NT \\ e_{-l_{l,t}} - e_{-l_{l,t-1}} & t \geq 2, \forall t \in NT \end{cases} \quad (48)$$

$$e_{-l_{l,t}} - e_{-l_{l,t-1}} \geq 0 \quad 2 \leq t \leq NT \quad (49)$$

其中, $e_{-l_{l,t}}$ 是线路 l 在 t 时刻的演进状况, 若为 1 则表示连接到交直流混合配电网, 否则为 0。

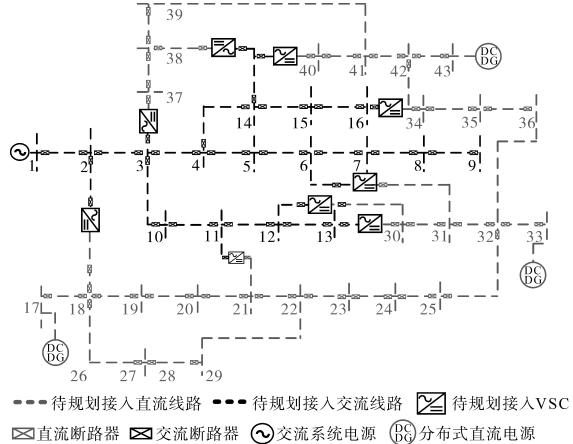
4 算例分析

在图 1 所示的交直流混合系统中设定了 9%, 18%, 27% 以及 36% 的分布式电源渗透率阶段, 每个阶段为 15 a。本文设置了两种方法进行对比, 方法 1 是本文提出的多阶段规划模型, 方法 2 是各阶段单独规划模型。

方法 1 和方法 2 每隔 15 a 的交直流混合系统拓扑规划结果如图 2 和图 3 所示。

本文方法在多阶段规划时考虑了直流负荷接入直流线路对混合配电网建设和运行费用的影响, 决策在直流节点 18, 37 经换流器接入交流节点 2, 3。两种方法建设经济性对比如表 1 所

示, 证明了本方法经济性的优势。



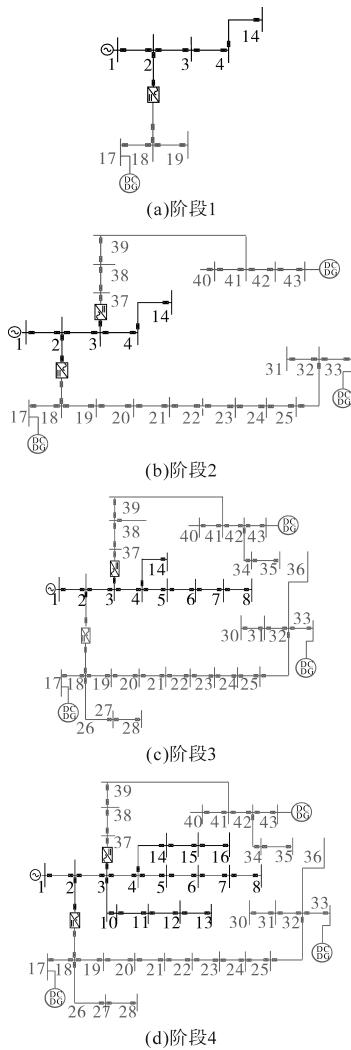


图3 交直流混合系统演进拓扑图(方法2)

Fig.3 Topological diagram of AC/DC hybrid systems (method 2)

表1 两种方法建设经济性对比

Tab.1 Comparison economics of two methods for construction

	交流线路	直流线路	VSC投建	总建设
	总长度/km	总长度/km	费用/万元	费用/万元
方法1	134.03	208.43	1.76	8 191.26
方法2	154.73	251.19	1.76	9 667.46

图4展示了两种方法下交直流混合配电网中各节点的电压情况。方法1的平均节点电压偏差为0.00932,而方法2的偏差为0.04975。方法1在传输过程中的损耗更小,能更有效地减少电压波动,提供更可靠的电力供应。

采用本文提出的改进的灰色聚类-CRITIC法对各项指标进行赋权处理,相应各指标的权重系数及两种方案的相应得分如表2所示。

方法1方案的总得分为0.790027,高于方法2的得分0.772775。评价结果显示,整体考虑多阶段的配电网演进规划模型在综合评价的表现

要优于单独考虑各阶段规划的方法,该结果证明了本文方法的优越性。

最后,进行收敛性分析。表3展示了方法1中松弛因子经4次迭代后,平均值降至5.38E-08,表明此时松弛的潮流约束已收紧。本文基于SSOCP框架的多阶段规划方法收敛性得到证明。

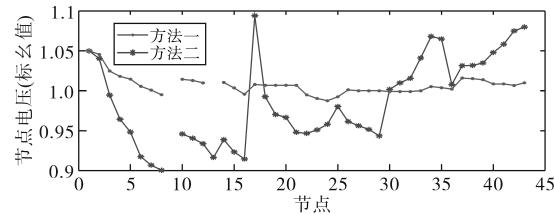


图4 两种方法下的节点电压

Fig.4 Nodal voltage under both methods

表2 评价体系指标权重与不同方案指标值

Tab.2 Evaluation system indicator weights and programme scores

指标 (标幺值)	ΔV	σ	ζ_{con}	C_{con}	C_{loss}	C_{vscloss}	I^{EENS}	I^{SAIFI}	I^{SAIDI}
权重	0.16	0.14	0.14	0.11	0.13	0.11	0.08	0.06	0.07
方法1	0.86	0.73	0.98	0.90	0.51	0.77	0.86	0.71	0.75
方法2	0.82	0.73	1.00	0.76	0.47	0.90	0.79	0.68	0.72

表3 线路松弛因子的迭代值

Tab.3 Iterative values of line relaxation factors

迭代次数	线路松弛因子(标幺值)				
	L_5	L_{13}	L_{19}	L_{22}	L_{27}
1	1.246	1.931	1.365	1.487	1.036
2	4.8E-7	4.6E-7	3.1E-7	2.6E-7	2.9E-7
3	8.3E-8	6.5E-8	9.7E-8	9.8E-8	8.7E-8
4	5.2E-8	3.7E-8	6.3E-8	6.4E-8	5.3E-8

5 结论

在交直流配电网的演进规划中,需要考虑各阶段演进的关联性。本文针对这一问题,提出了一种计及经济性的交直流混合配电网演进规划方法。首先,采用改进的灰色聚类-CRITIC组合赋权法来评估和确定关键指标权重,随后在SSOCP框架下,构建了交直流混合配电网的多阶段演进规划模型。通过对算例验证了所提方法的可行性和有效性,为交直流混合配电网的优化规划提供了可参考的解决方案。

参考文献

- [1] 梁永亮,吴跃斌,马钊,等.新一代低压直流供用电系统在“新基建”中的应用技术分析及发展展望[J].中国电机工程学报,2021,41(1):13-24,394.
LIANG Yongliang, WU Yuebin, MA Zhao, et al. Application and development prospect of new generation of LVDC supply

- and utilization system in "new infrastructure"[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 13–24, 394.
- [2] 岳园园, 张超, 袁性忠, 等. 考虑空间负荷布局的多电源配电网动态规划优化[J]. 电气传动, 2022, 52(19): 60–67.
YUE Yuanyuan, ZHANG Chao, YUAN Xingzhong, et al. Dynamic planning optimization of multi-power distribution network considering spatial load layout[J]. Electric Drive, 2022, 52(19): 60–67.
- [3] 黄震, 宋璇坤, 刘思革, 等. 电网智能化发展评价指标体系及关键指标研究[J]. 供用电, 2016, 33(2): 43–47, 42.
HUANG Zhen, SONG Xuankun, LIU Sige, et al. Study on the evaluation index system and the key indexes of grid intelligence development[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(2): 43–47, 42.
- [4] 高崇, 潘险险, 许志恒, 等. 面向微网规划评价的指标归类量化方法研究[J]. 电气传动, 2023, 53(5): 25–32.
GAO Chong, PAN Xianxian, XU Zhiheng, et al. Research on the classification and quantification method of evaluation factors for comprehensive evaluation of microgrid planning[J]. Electric Drive, 2023, 53(5): 25–32.
- [5] 王沐凡. 交直流混合微电网及其集群随机规划方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
WANG Mufan. Research on clustering random programming method for AC/DC hybrid microgrid and its groups[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [6] 王伟. 交直流配电网网架优化规划及典型应用场景研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
WANG Wei. Optimization planning of AC/DC distribution net-
- work and typical application scenarios[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [7] SHANG L, HU R, WEI T, et al. Multiobjective optimization for hybrid AC/DC distribution network structure considering reliability[C]/2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), 2021: 3034–3041.
- [8] WANG L, ZHAO Q, WANG S, et al. A novel grid planning method of AC/DC distribution network for controllability and flexibility reinforcement[C]/2023 International Conference on Power System Technology (PowerCon), 2023: 1–5.
- [9] 邓嘉浩, 林凌雪, 朱林, 等. 多阶段多属性配电网规划项目优选模型及求解[J]. 电气传动, 2024, 54(4): 67–74.
DENG Jiahao, LIN Lingxue, ZHU Lin, et al. Multi-stage and multi-attribute distribution network planning project optimal selection model and its solution[J]. Electric Drive, 2024, 54(4): 67–74.
- [10] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763–770.
- [11] WANG Y, SU X, SONG M, et al. Sequential load restoration with soft open points and time-dependent cold load pickup for resilient distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023: 3262199.

收稿日期:2024-04-21

修改稿日期:2024-05-22