DOI:10.3969/j.issn.1009-1831.2026.06.015 文章编号:1009-1831(2026)06-0103-07 中图分类号:TM73

# 计及新能源集群运行特性的多类型换流站配置方案评价方法

余 金[1],黄 慧[2],蒙昌营[1],李兆伟[2],陈 诚[1],吴雪莲[2]
(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院,乌鲁木齐 830002;2. 国电南瑞南京控制系统有限公司,南京 211000)

**摘要**:高比例新能源集群并网后会导致直流系统送端电网出现短路容量不足、电压支撑薄弱等问题,单一换流站技术难以同时兼顾高比例新能源送端电网的经济性与稳定性要求。因此提出计及新能源集群运行特性的多类型换流站配置方案综合评价方法。首先分析新能源集群经多类型换流站外送传输系统的运行原理,阐明常规直流送端换流站与柔性直流送端换流站的协同互补机制,引入换流器交互量化指标(multi-infeed voltage interaction factor,MVIF)、关键节点过电压峰值、新能源场站短路比(renewable energy stations short circuit ratio,RSCR)3项核心指标,量化表征系统运行关键特征。其次,计及新能源集群运行特性与送端换流站间交互影响,建立覆盖成本效益、稳态安全、暂态抗扰三大维度的综合评价指标体系,采用熵权法与逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution,TOPSIS)组合算法完成指标客观赋权与配置方案的综合排序。最后,结合西北某高比例新能源送端电网典型场景开展算例分析,验证了方法的有效性与工程实用性。

**关键词**:新能源集群送出;送端电网;多类型换流站;优化配置;综合评价;协同规划

# Evaluation method for configuration schemes of multi-type converter stations considering operation characteristics of new energy clusters

*YU Jin*[1], *HUANG Hui*[2], *MENG Changying*[1], *LI Zhaowei*[2], *CHEN Cheng*[1], *WU Xuelian*[2]
(1. Economic and Technical Research Institute, State Grid Xinjiang Electric power Co., Ltd., Urumqi 830002, China; 2. NARI Technology Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 211000, China)

**Abstract**: High-penetration new energy cluster grid integration leads to insufficient short-circuit capacity and inadequate voltage support in DC sending-end power grids, where single-converter-station schemes cannot satisfy economic and stability constraints simultaneously. A comprehensive evaluation method for multi-type converter station configuration schemes considering new energy cluster operational characteristics is proposed. The operational mechanism of multi-type converter station-based new energy outgoing transmission systems is analyzed, and the synergistic complementary characteristics of line-commutated converter (LCC) and voltage source converter (VSC) sending-end stations are clarified. Three quantitative indices, including the multi-infeed voltage interaction factor (MVIF), key node peak overvoltage, and renewable energy stations short circuit ratio (RSCR), are employed to characterize system operating performance. Considering the coupling interactions between new energy clusters and sending-end converter stations, a three-dimensional evaluation index system covering economic benefit, steady-state security, and transient disturbance resistance is constructed. The integrated entropy weight-TOPSIS algorithm is applied to achieve objective index weighting and optimal configuration scheme ranking. Case studies based on a practical high-penetration new energy sending-end power grid in Northwest China validate the effectiveness and engineering applicability of the proposed method.

**Key words**: renewable energy cluster transmission; sending-end power grid; multi-type converter stations; optimal allocation; comprehensive evaluation; collaborative planning

## 0 引言

在“双碳”目标驱动下,我国风电、光伏等新能源装机规模持续增长。受区域用电负荷规模限制,新能源富集区却难以实现完全就地消纳。因此,依托特高压直流输电实现新能源集群跨区外送,已成为我国新能源高效配置的核心模式。作为核心模式的关键技术载体,不同类型的直流换流技术在应对新能源送出时的运行特性与适应能力呈现显著差异[1-3]。

**收稿日期**:2026-06-25;**修回日期**:2026-09-04
**基金项目**:新疆疆内交流电网与直流大母线耦合支撑运行分析(5230JY25000P)

基于电网换相技术的常规直流输电凭借技术成熟、运行损耗低、建设成本低廉等优势，已在实际输电工程中得到广泛应用[4]。围绕常直换流站的落点筛选与运行优化，已取得丰富研究成果。文献[5-7]分别从特高压直流落点优化、换流站选址及新能源渗透率极限估计角度，提升了目标电网消纳能力与高效运行水平。文献[8]针对特高压直流分层接入电网的落点选择问题，建立了综合评价指标并采用逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution，TOPSIS)构建了有效的落点选择策略。然而，随着新能源渗透率持续提高，其出力不确定性对电网运行的影响显著增强，常规直流系统难以满足新型电力系统对灵活调节和动态支撑能力的需求[9-11]。

而柔性直流输电系统具备主动功率调节和动态电压支撑能力，更适应高比例新能源接入场景[12-13]。其换流站优化配置已成为近年工程与学术领域的研究热点。文献[14]提出考虑新能源集群出力时空分布的多场景优化配置方法，以消纳率最大化和网损最小化为目标，协同优化换流站选址、定容及新能源接入点匹配方案。文献[15]考虑送端暂态稳定约束，提出计及故障穿越与虚拟惯量支撑的换流站定容方法，弥补了传统方案仅考虑稳态工况的不足。文献[16]针对新能源出力的强不确定性，提出柔直换流站鲁棒优化配置策略，通过区间规划刻画出力波动边界，保障了极端场景下的运行可靠性。

由上述分析可知，现有研究多聚焦于单一换流技术或特定运行目标，对西北地区高比例新能源送端电网的适用性仍存在局限。此类电网具有新能源占比高、外送规模大、交流系统支撑能力相对有限等特征，并需配置一定比例的同步电源维持稳定运行。随着电源结构与输电需求的发展，多类型直流协同接入、联合外送正成为送端电网的重要发展趋势[17-18]。对此类应用场景，在输电电压等级、输送容量、输送距离、网架结构、电源支撑能力及运行方式等工程边界条件明确后，多类型送端换流站的落点配置及协同规划将成为影响系统经济性、安全稳定水平和新能源消纳能力的重要因素。然而，针对多新能源集群耦合运行条件下的多类型送端换流站落点配置、协同规划及配置方案综合评价问题，目前仍缺乏统一的分析框架和系统化评价方法。

因此，本文聚焦送端电网高比例新能源接入的应用场景，开展多类型送端换流站配置方案综合评价方法研究。通过分析常直与柔直送端换流站的运行机理及其协同特性，构建送端电网多类型换流站外送系统拓扑，结合新能源集群运行特性与送端换流站之间的交互影响，建立多维度评价指标体系，并采用熵权法与TOPSIS法组合算法对各配置方案的综合优越性进行定量评估，为送端电网多类型换流站的优化配置研究提供支撑。

## 1 多类型换流站送出系统拓扑及工作原理

### 1.1 拓扑结构

西北地区是我国新能源发电的核心区域，随着多类型送端换流站的规划与应用，形成含高比例新能源送端电网经多类型直流系统外送的格局是其发展的重要途径之一[19]，其拓扑如图1所示。

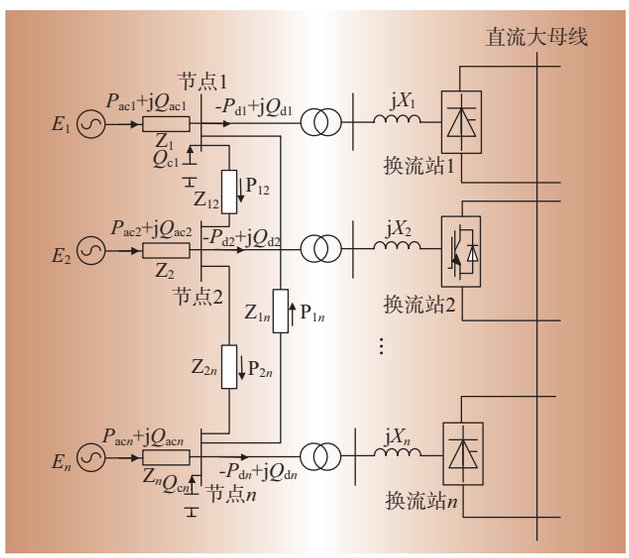



**图1 新能源集群经多类型换流站送出系统拓扑**

**Fig. 1 Topology of the transmission system for renewable energy clusters via multi-type converter stations**

图1中换流站1和换流站$n$为常直送端换流站；换流站2为柔直送端换流站，各换流站的直流侧输出端均接入同一直流大母线，可实现直流功率汇总后向外输送；$Z_{ij}$为换流母线$i$与换流母线$j$之间的等效阻抗；$Z_n$代表送端电网等效阻抗，$Q_{c,i}$为第$i$个常直送端换流站所配置的无功补偿容量。

以节点2为例，其功率平衡关系遵循交流网侧功率守恒定律。有功功率方面，能源基地2注入的有功功率等于流向换流站2、节点1和节点$n$的有功功率之和；无功功率方面，补偿装置与能源基地注入的无功功率共同平衡上述3个方向无功需求，维持节点2处的功率动态平衡。

### 1.2 换流站工作原理

#### 1.2.1 常直送端换流站工作原理

常规直流送端换流站基于电网换相原理运行，其换相过程强依赖送端交流电网的电压支撑，弱电

网工况下易诱发换相失败等暂态问题。

常直送端换流站运行时有功传输功率 $P_{dr}$ 和所需的无功功率 $Q_r$ 的表达式为

$$P_{dr}=U_{dr}I_d \tag{1}$$

$$Q_r=P_{dr}\tan\varphi \tag{2}$$

式中：$U_{dr}$ 为整流侧直流电压，$I_d$ 为直流电流，$\varphi$ 为功率因数角。常直送端换流站一般会配置滤波器和电容器等无功补偿装置满足其无功需求。

#### 1.2.2　柔直送端换流站工作原理

柔性直流输电系统通过全控型电力电子器件的可控通断实现交流与直流的功率变换，可独立完成有功功率与无功功率的解耦调节，能够主动参与送端电网的电压调节与功率平抑，为弱送端系统提供灵活的动态支撑。柔直送端换流站所调制的有功功率 $P_{ac}$ 和无功功率 $Q_{MMC}$ 可表示为

$$P_{ac}=3\frac{U_{MMC,i}U_{a,i}}{X_{ac}}\sin\delta_i \tag{3}$$

$$Q_{MMC}=3\frac{U_{MMC,i}(U_{MMC,i}-U_{a,i}\cos\delta_i)}{X_{ac}} \tag{4}$$

式中：$U_{MMC,i}$ 为柔直送端换流站交流侧输出基波相电压有效值；$U_{a,i}$ 为送端交流电网等效电势有效值；$X_{ac}$ 为交流系统等效基波阻抗；$\delta_i$ 为相位差。

## 2　多类型送端换流站配置方案评价指标

### 2.1　特征分析

单一类型送端换流站已难以适应大规模新能源外送需求，换流方式应综合考虑网架结构、电源支撑条件及系统抗扰需求。常直送端换流站适用于火电占比较高、交流支撑能力较强的送端系统，但在高比例新能源弱送端场景下，可能造成新能源场站短路比降低，增大换相失败、暂态过电压及多回直流交互风险。柔直送端换流站虽具有较强的动态支撑能力，但工程投资和运行损耗较高，难以同时兼顾经济性与大容量输电需求。

多类型送端换流站协同规划是兼顾送端电网安全性与经济性的重要途径。常直送端换流站承担大容量功率输送任务，柔直送端换流站通过灵活的无功调节能力抑制新能源出力波动引起的电压扰动，提高新能源场站短路比并增强交流系统电压支撑能力。在暂态过程中，柔直送端换流站可为常直送端换流站提供动态无功支撑，稳定换相母线电压，降低换相失败及其引发的关键节点过电压风险。同时，通过优化常规直流与柔性直流的落点布局及容量配比，可减弱不同换流站间的电气耦合强度，抑制扰动传播，提高系统整体稳定性。对上述特性进行量化分析，可为多类型送端换流站的协同规划与优化配置提供依据。

### 2.2　换流站交互量化指标

针对多类型换流站之间复杂的交互作用，构建了一种不受换流器类型与控制模式限制的换流站交互量化指标（multi-infeed voltage interaction factor，MVIF）。该指标定义为换流器 $i$ 母线发生增量变化时，换流器 $j$ 与 $i$ 的母线电压相量变化幅值之比，即分子为换流器 $j$ 母线电压相量变化幅值 $\Delta\tilde{U}_j$，分母为换流器 $i$ 母线电压相量变化幅值 $\Delta\tilde{U}_i$，用以表征不同换流站母线之间电压变化的传递程度。

$$M_{VIFji}=\left|\Delta\tilde{U}_j\right|\Big/\left|\Delta\tilde{U}_i\right| \tag{5}$$

当换流器 $i$ 运行于图2(a)所示的常直送端非恒压控制模式，或图2(b)所示的柔直送端恒压控制模式时，总是满足 $\left|\Delta\tilde{U}_i\right|\neq0$。这使得 $M_{VIF}$ 实现了交互评估的统一性，可统一量化不同类型换流站间的交互强度，从而为规避系统交互风险、支撑电网规划和调度提供可靠技术依据。

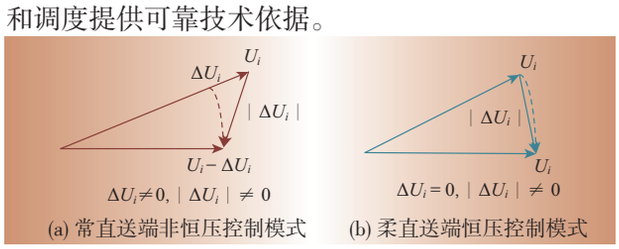



**图2　电压变化特性**

**Fig. 2　Voltage variation characteristic**

### 2.3　新能源场站短路比

暂态风险与送端电压支撑能力相关，高比例新能源致短路容量下降，进一步加剧暂态过电压及宽频振荡等运行风险。故引入新能源场站短路比（renewable energy stations short circuit ratio，RSCR）评估电网强度。定义为并网节点处三相短路容量与并网设备额定功率之比

$$R_{SCR}=\frac{S_{CCMVA}}{P_{MW}} \tag{6}$$

式中：$S_{CCMVA}$ 为并网节点处的三相短路容量；$P_{MW}$ 为额定有功功率。

### 2.4　关键节点过电压峰值

多类型送端换流站协同运行时，常规直流换相失败将引发电网暂态过电压。取过电压峰值 $U_L$ 作为系统暂态风险的核心指标

$$U_L=a-\sqrt{a^2-\frac{S_{cr}+Q_{ac}-I_{drmin}\sqrt{U_{dr0}^2-(I_{drmin}R_d)^2}}{Q_{crN}}} \tag{7}$$

式中：$a$ 为无功功率系数，$a=\dfrac{S_{cr}}{2Q_{crN}}$；$U_{dr0}$ 为空载直流电压；$I_{drmin}$ 为电流最小值；$R_d$ 为直流线路电阻；

$S_{cr}$ 为整流侧换流母线短路容量；$Q_{ac}$ 为交流电网无功功率输出；$Q_{crN}$ 为无功补偿装置输出的无功功率。

## 3 多维度评价指标体系构建

由于多类型送端换流站不同待配置方案在成本投入、运行安全及抗扰动能力等方面呈现显著差异，单一维度的性能评估难以全面反映方案的综合优越性。可从成本效益、稳态安全、暂态抗扰三大核心维度设计评价指标体系，如图3所示。

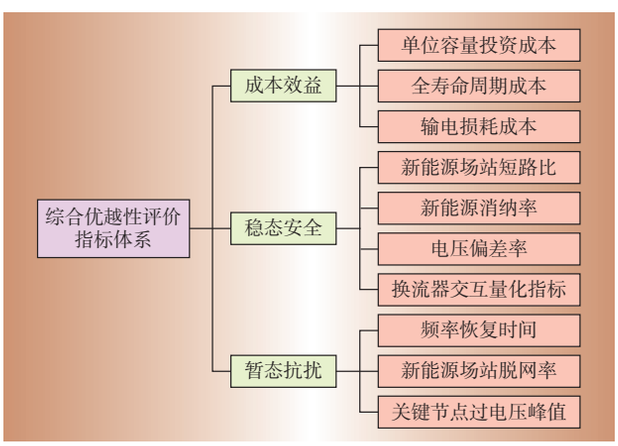



**图3 综合优越性评价指标体系**

**Fig. 3 Evaluation index system for comprehensive superiority**

### 3.1 成本效益维度

（1）单位容量投资成本

投资成本反映建设阶段的经济性，表征单位输送容量的投资效率，以直流系统总投资与额定输送容量的比值进行量化

$$C_{\text{inv-unit}}=\frac{C_{\text{total-inv}}}{P_{\text{trans-rated}}} \tag{8}$$

式中：$C_{\text{total-inv}}$ 为直流系统各类装置的总投资；$P_{\text{trans-rated}}$ 为系统总输送额定容量。该指标值越小，待选配置方案的初始投资经济性越优。

（2）全寿命周期成本

全寿命周期成本旨在评估方案在设备设计寿命内的总体经济负担，涵盖了初始投资、逐年运维及损耗费用，并计入残值回收以抵减净投入，其全寿命周期成本表示为

$$C_{\text{life}}=C_{\text{inv}}+\sum_{t=1}^{T}(C_{\text{op},t}+C_{\text{loss},t})v^t-C_{\text{salvage}}v^T \tag{9}$$

式中：$v$ 为折现因子，$v=(1+r)^{-1}$；$C_{\text{inv}}$ 为初始投资成本；$T$ 为设备设计寿命，年；$C_{\text{op},t}$ 为第 $t$ 年运维成本；$C_{\text{loss},t}$ 为第 $t$ 年输电损耗成本；$r$ 为基准收益率；$C_{\text{salvage}}$ 为设备达到设计寿命报废后的残值，即设备退役处置后的可回收净价值，通常按初始投资成本的3%~5%计取；$\frac{C_{\text{salvage}}}{(1+r)^T}$ 为设备残值的现值。

（3）单位电量输电损耗成本

单位电量输电损耗成本采用年均输电损耗与年均总输送电量的比值以衡量单位输送电量的损耗费用

$$C_{\text{loss-unit}}=\frac{C_{\text{loss,annual}}}{E_{\text{trans,annual}}} \tag{10}$$

式中：$C_{\text{loss,annual}}$ 为年均输电损耗成本，$E_{\text{trans,annual}}$ 为年均总输送电量。

### 3.2 稳态安全维度

（1）新能源消纳率

该值由新能源实际并网年发电量占场站年总发电量的比重确定

$$\eta_{\text{absorb}}=\frac{E_{\text{ren-grid}}}{E_{\text{ren-gen}}}\times 100\% \tag{11}$$

式中：$E_{\text{ren-gen}}$ 为新能源场站年总发电量；$E_{\text{ren-grid}}$ 为新能源实际并网年发电量。

（2）电压偏差率

电压偏差率反映换流母线及新能源并网点的稳态电压控制精度，可评估换流站的无功调节效果

$$\Delta U=\frac{U_{\text{actual}}-U_{\text{rated}}}{U_{\text{rated}}}\times 100\% \tag{12}$$

式中：$U_{\text{actual}}$ 为目标节点实际运行电压有效值；$U_{\text{rated}}$ 为目标节点额定电压。当电网正常运行时偏差应 $\leqslant\pm 5\%$。

### 3.3 暂态抗扰维度

（1）频率恢复时间

该指标用于衡量扰动后系统频率恢复至额定范围的速度，体现柔直换流器的频率支撑与快速响应能力

$$T_{\text{f-recover}}=t_{\text{f-stable}}-t_{\text{disturb-start}} \tag{13}$$

式中：$t_{\text{disturb-start}}$ 为扰动发生时刻，$t_{\text{f-stable}}$ 为系统频率恢复至额定频率±0.2 Hz内并稳定持续3 s的时刻。$T_{\text{f-recover}}\leqslant 10$ s可满足电网稳定运行要求。

（2）新能源场站脱网率

以故障后脱网容量占场站额定总容量的比重，量化暂态扰动对新能源并网稳定性的影响程度

$$R_{\text{ren-trip}}=\frac{P_{\text{ren-trip}}}{P_{\text{ren-rated}}}\times 100\% \tag{14}$$

式中：$P_{\text{ren-trip}}$ 为扰动后新能源场站脱网总容量；$P_{\text{ren-rated}}$ 新能源场站额定总容量。当 $R_{\text{ren-trip}}\leqslant 5\%$ 时，能避免大规模脱网引发系统功率失衡。

### 3.4 评价指标体系计算方法

为对上述多维度指标体系进行综合量化评价，采用熵权法-TOPSIS组合评价方法对待选方案进行量化优选。首先，基于各待选方案的底层指标实测

值构建初始决策矩阵 $\boldsymbol{A}$，并根据指标性质进行标准化处理以消除量纲差异得到标准化矩阵 $\boldsymbol{B}$。对于数值越大越优的正向型指标和数值越小越优的逆向型指标，分别采用极差标准化法，即用实际值减去最小值除以极差，或用最大值减去实际值除以极差，将各指标统一变换到[0,1]区间，以消除量纲差异进行标准化处理。

其次，采用熵权法确定各指标客观权重，熵权法通过指标变异程度反映信息量，需先计算各指标的熵值作为权重确定的基础，熵值越小表明指标区分能力越强，权重越大。第 $j$ 项指标的熵值 $e_j$ 及其权重 $\omega_j$ 表达式如下

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln p_{ij},\quad p_{ij}=\frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}b_{ij}} \tag{15}$$

$$\omega_j=\frac{(1-e_j)}{\sum_{j=1}^{n}(1-e_j)} \tag{16}$$

进而，基于标准化矩阵 $\boldsymbol{B}$ 与权重向量构造加权决策矩阵 $\boldsymbol{Z}$。确定各指标最优值作为正理想解 $Z^+$ 与各指标最劣值作为负理想解 $Z^-$，分别计算各方案与正、负理想解的欧氏距离 $S_i^+$ 与 $S_i^-$，最后得到各方案的贴近系数 $C_i$，表示如下

$$C_i=\frac{S_i^-}{S_i^-+S_i^+} \tag{17}$$

式中：$C_i$ 为第 $i$ 个待配置方案的贴近系数，取值范围[0,1]，取值越大表明方案越接近理想最优状态。按贴近系数降序排列，即可确定综合性能最优的配置方案。

## 4　算例分析

为验证所提多类型送端换流站配置方案综合评价方法的有效性与可行性，本章结合西北某电网实际场景开展算例分析。候选方案包括4种常直—柔直混合配置方案以及纯常直、纯柔直两种基础对照方案，基于送端换流站落点组合开展配置评价，换流站落点位置示意如图4所示。算例通过对不同送端换流站配置方案的建模计算与指标量化比较各方案在经济性、稳态安全及暂态抗扰能力方面的差异。

综合考虑该电网分区新能源资源、网架结构、火电布局及负荷特性，为适配新能源规模化外送与受端可靠供电需求，电网前期规划调研阶段已确定A1和A2分别为常直送端换流站待选落点，A3和A4分别为柔直送端换流站的待选落点，逆变站待选落点聚焦于受端负荷中心区域。综合考量输电通道路径合理性、地理位置关联性、环境承载力及工程建设可行性等约束条件，构建6个多类型换流站协同配置待选方案：方案S1为A1-A3，方案S2为A1-A4，方案S3为A2-A3，方案S4为A2-A4，方案S5为A1-A2，方案S6为A3-A4。系统额定电压等级为±800 kV，由常直送端换流站与柔直送端换流站在同区域外送基地内并联多馈入接入。

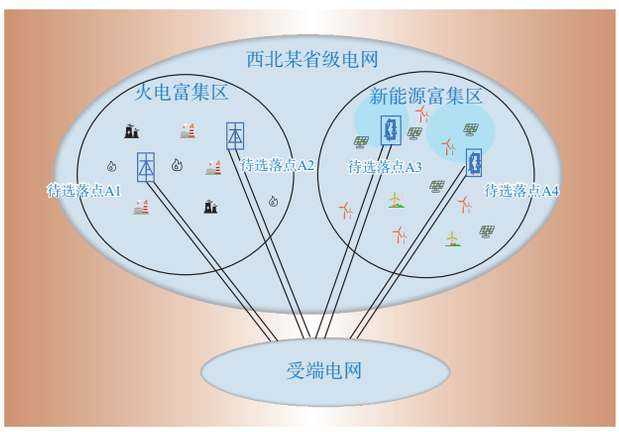



**图4　多类型送端换流站待选落点示意**

**Fig. 4　Candidate locations of multi-type sending-end converter stations**

### 4.1　底层指标计算

为验证所提综合评价体系对多类型送端换流站配置方案的适用性，综合考虑换流器交互特性、关键节点过电压风险、新能源场站短路比以及经济性、安全性等评价指标，借助机电暂态仿真平台开展潮流计算与暂态仿真分析，获得各项底层指标。其中，单位容量投资成本和全寿命周期成本采用工程实际测算预估值。基于上述方法，对6种多类型送端换流站配置方案进行评估，底层指标计算结果如附录A表A-1所示。

仿真结果表明，6种方案在各维度上差异显著。纯常规直流方案S5经济性最优，但短路容量支撑不足，多馈入电压交互因子及暂态过电压较高，易诱发换相失败及连锁脱网风险，综合评价垫底。纯柔性直流方案S6安全裕度与暂态抗扰能力优越，但长期经济性较差，综合排名第3。而方案S1经济性与电网强度较优，但电压调节与暂态抗扰能力不足；方案S3电压控制精度较高，但全寿命周期成本偏高，新能源消纳效率偏低；方案S4初始投资略高、频率恢复时间稍长。方案S2新能源消纳水平与暂态频率响应性能突出，故障后频率恢复速度快、新能源场站脱网风险低，综合指标表现最优。

### 4.2　综合评分计算

#### 4.2.1　指标熵值与客观权重计算

据式(15)计算各指标的熵值，单位电量输电损

耗成本、新能源场站短路比、电压偏差率的熵值较低，分别为0.792、0.857和0.870，表明3项指标在各方案间差异显著，区分能力更强。全寿命周期成本、关键节点过电压峰值的熵值分别为0.890和0.893，指标区分能力相对较弱。

进一步据式(16)计算各指标客观权重 $\omega_j$，各底层指标的熵值与客观权重计算结果见附录表A-2。

#### 4.2.2 方案距离与贴近系数计算

结合上述所得结果依据3.4节计算公式，分别计算6种配置方案到正理想点和负理想点的几何距离，各方案的距离计算结果呈现出明显差异。而根据贴近系数计算公式，将各方案的距离值代入计算得到对应的贴近系数，方案S1—方案S4的贴近系数均处于0~1区间内，分别为0.580、0.622、0.475和0.532。基础对照方案S5与方案S6的贴近系数分别为0.448和0.552。依据贴近系数的大小对6种配置方案进行降序排列，最终得到的综合排序结果为S2>S1>S6>S4>S3>S5。其对比如图5所示。

从算例计算结果能够看出，S2配置方案在综合性能上表现最优，相较纯柔直方案，降低了换流站投资与全寿命周期成本。又通过柔直送端换流站的合理配置，弥补了常直送端换流站电压支撑不足、抗扰动能力弱的缺陷，在稳态安全与暂态抗扰方面达到了较好水平。

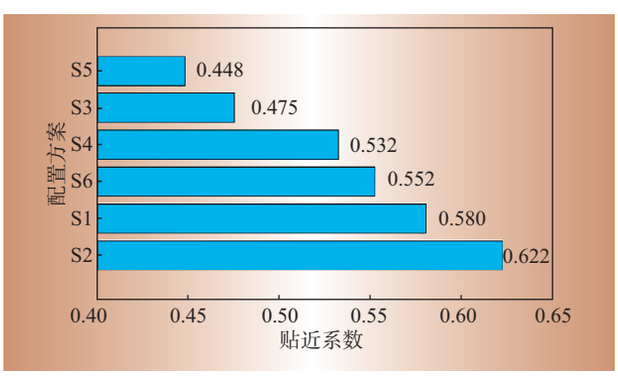



图5 贴近系数对比

Fig. 5 Comparison of closeness coefficients

## 5 结束语

本文在分析多类型送端换流站运行特性及其交互影响的基础上，构建了兼顾成本效益、稳态安全和暂态抗扰能力的综合评价指标体系，并结合熵权法与TOPSIS方法，对高比例新能源送端电网中不同换流站配置方案进行了量化评价与优选。主要结论如下：

(1) 针对常规直流与柔性直流协同外送的高比例新能源送端电网，提出一种计及新能源集群运行特性的多类型换流站协同规划与配置方案综合评价方法，实现了配置方案的综合评估与优选。

(2) 针对多类型换流站协同外送场景下交互耦合增强、电压支撑弱化及暂态过电压风险突出等特征，构建换流器交互量化指标，并引入新能源场站短路比和关键节点过电压峰值3项核心指标，为配置方案的稳态安全与暂态抗扰性能评估提供了量化依据。

(3) 综合考虑新能源集群运行特性与换流站交互影响，建立了涵盖经济性、稳态安全及暂态抗扰的三维评价体系，结合熵权法与TOPSIS实现指标客观赋权与方案排序，为多类型换流站规划提供量化决策依据。

## 参考文献：

[1] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2 717-2 736.
Zhang Zhigang, Kang Chongqing. Challenges and prospects of constructing a new power system under the carbon neutrality target [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8):2 717-2 736.

[2] 阎怀东，蔡立华，沙骏，等. 高比例新能源接入的配电网集群划分及电压控制[J]. 电力需求侧管理，2021，23(4)：8-13.
Yan Huaidong, Cai Lihua, Sha Jun, et al. Cluster division and voltage control of distribution network with high penetration of new energy access [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(4):8-13.

[3] 谭显东，刘俊，徐志成，等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力，2021，54(5)：1-6.
Tan Xiandong, Liu Jun, Xu Zhicheng, et al. Power supply and demand situation in the 14th-five-year plan period under the “dual carbon” target [J]. Electric Power, 2021, 54(5):1-6.

[4] Liu Z, Yu J, Guo X, et al. Survey of technologies of line commutated converter based high voltage direct current transmission in china [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2):1-8.

[5] 严欢，王雷，李再华，等. 提升新能源高占比送端电网接入能力的特高压直流落点方案及措施研究[J]. 电气应用，2023，42(7)：1-8.
Yan Huan, Wang Lei, Li Zaihua, et al. Research on UHVDC sending-end location scheme and measures to improve access capacity of sending-end power grid with high proportion of new energy [J]. Electric Power Application, 2023, 42(7):1-8.

[6] 蒋强，肖建，何都益，等. 基于复杂网络理论的直流换流站选址[J]. 电力系统保护与控制，2011，39(22)：

40-45.
Jiang Qiang, Xiao Jian, He Duyi, et al. Site selection for HVDC converter station based on complex network theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22):40-45.

[7] 陈义宣,王国腾,李玲芳,等.计及安全稳定约束的多直流送出电网新能源极限渗透率估计方法[J].电力自动化设备,2023,43(9):236-242.
Chen Yixuan, Wang Guoteng, Li Lingfang, et al. Estimation method of new energy limit penetration rate for multi-DC sending grid considering security and stability constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9):236-242.

[8] 翟海保,李兆伟,黄慧,等.特高压直流分层接入电网的落点选择研究[J].电力工程技术,2018,37(1):65-71.
Zhai Haibao, Li Zhaowei, Huang Hui, et al. Terminal location selection study for uhvdc hierarchical connection to power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1):65-71.

[9] 曾嵘,屈鲁,余占清,等.支撑新能源送出的新型直流换流技术[J].高电压技术,2025,51(8):4 194-4 208.
Zeng Rong, Qu Lu, Yu Zhanqing, et al. A new type of DC converter technology supporting new energy transmission[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8):4 194-4 208.

[10] 朱海,郝亮亮,和敬涵,等.HVDC送端交流系统故障引起换相失败的机理分析[J].电工技术学报,2023,38(16):4 465-4 476.
Zhu Hai, Hao Liangliang, He Jinghan, et al. Mechanism analysis of commutation failure caused by AC system fault at HVDC sending end[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16):4 465-4 476.

[11] 许汉平,杨炜晨,张东寅,等.考虑换相失败相互影响的多馈入高压直流系统换相失败判断方法[J].电工技术学报,2020,35(8):1 776-1 786.
Xu Hanping, Yang Weichen, Zhang Dongyin, et al. Commutation failure judgment method for multi-infeed HVDC system considering mutual influence of commutation failure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8):1 776-1 786.

[12] 陈欢,王振,杨治中,等.并联混合直流输电系统中传统直流和柔性直流暂态无功协调控制策略研究[J].电网技术,2017,41(6):1 719-1 725.
Chen Huan, Wang Zhen, Yang Zhizhong, et al. Research on transient reactive power coordinated control strategy for conventional DC and VSC-HVDC in parallel hybrid HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1 719-1 725.

[13] 洪福斌,蔡小辰,刘贵,等.面向碳减排与弹性提升的交直流混合配电网协同优化调控方法[J].电力需求侧管理,2026,28(1):24-32.
Hong Fubin, Cai Xiaochen, Liu Gui, et al. Collaborative optimal regulation method of AC-DC hybrid distribution network for carbon emi-ssion reduction and resilience improvement[J]. Power Demand Side Management, 2026, 28(1):24-32.

[14] 杨伟涛,张尧,郭晓,等.海上风电经柔直送出分接开关控制保护策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2026,47(2):98-106.
Yang Weitao, Zhang Yao, Guo Xiao, et al. Research on control and protection strategy of on-load tap-changer for offshore wind power transmitted via VSC-HVDC[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2026, 47(2):98-106.

[15] 方洁,张哲任,徐政.同步机电源占比对经柔性直流送出的新能源基地电网暂态同步稳定性的影响[J].全球能源互联网,2025,8(6):677-689.
Fang Jie, Zhang Zheren, Xu Zheng. Influence of synchronous machine power ratio on transient synchronous stability of renewable energy base grid transmitted via VSC-HVDC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2025, 8(6):677-689.

[16] 甘慧辰,肖晃庆,郭铸,等.新能源送出柔性直流系统送受两端构网型控制技术[J].电力系统自动化,2026,50(11):40-51.
Gan Huichen, Xiao Huangqing, Guo Zhu, et al. Grid-Forming control technology at sending and receiving ends of VSC-HVDC system for renewable energy transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2026, 50(11):40-51.

[17] 李云丰,赵文广,贺之渊,等.连接弱交流电网的柔性直流换流站外环控制器参数解析计算及其限制因素分析[J].中国电机工程学报,2023,43(24):9 682-9 696.
Li Yunfeng, Zhao Wenguang, He Zhiyuan, et al. Analytical calculation of outer-loop controller parameters for VSC-HVDC converter station connected to weak AC grid and its limiting factors analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24):9 682-9 696.

[18] 曾雪洋,刘天琪,王顺亮,等.风电场柔性直流并网与传统直流外送的源网协调控制策略[J].电网技术,2017,41(5):1 390-1 398.
Zeng Xueyang, Liu Tianqi, Wang Shunliang, et al. Source-grid coordinated control strategy for wind farm grid-connected via VSC-HVDC and sent out via LCC-HVDC[J]. Power System Technology, 2017, 41(5):1 390-1 398.

[19] 李震,韩林阳,李庆生,等.送端电网省份开展需求响应的现状分析及建议[J].电力需求侧管理,2023,25(6):69-75.
Li Zhen, Han Linyang, Li Qingsheng, et al. Current situation analysis and suggestions on implementing demand response in provinces of sending end power grid[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(6):69-75.

**作者简介：**
余金(1991),男,新疆阿克苏人,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网规划。

**(责任编辑　孙　晶　王晗雯)**

# 附录

表 A-1　可配置方案各指标计算结果

Table A-1　Calculation results of each index for configurable schemes

| 评价维度 | 底层指标 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 成本效益 | $C_{\text{inv-unit}}$ | 5.800 | 6.200 | 5.600 | 6.400 | 4.900 | 7.800 |
| | $C_{\text{life}}$ | 82.000 | 84.000 | 85.000 | 83.000 | 78.000 | 96.000 |
| | $C_{\text{loss-unit}}$ | 0.027 | 0.024 | 0.030 | 0.028 | 0.022 | 0.031 |
| 稳态安全 | $R_{\text{SCR}}$ | 6.819 | 5.665 | 5.192 | 6.066 | 3.120 | 9.150 |
| | $\eta_{\text{absorb}}$ | 95.700 | 96.300 | 94.400 | 95.200 | 91.200 | 98.200 |
| | $\delta_{\text{U}}$ | 1.700 | 1.600 | 1.300 | 1.600 | 2.300 | 0.900 |
| | $M_{\text{VIF}}$ | 1.200 | 1.400 | 1.300 | 1.200 | 2.100 | 0.500 |
| 暂态抗扰 | $T_{\text{f-recover}}$ | 4.000 | 3.700 | 3.900 | 4.100 | 5.900 | 2.800 |
| | $R_{\text{en-trip}}$ | 0.800 | 0.600 | 0.700 | 0.500 | 1.600 | 0.200 |
| | $U_{\text{L}}$ | 1.018 | 1.049 | 1.040 | 1.020 | 1.150 | 1.003 |

表 A-2　各底层指标熵值与客观权重

Table A-2　entropy values and objective weights of underlying indicators

| 底层指标 | 熵值 | 权重 |
|---|---|---|
| $C_{\text{inv-unit}}$ | 0.880 | 0.093 |
| $C_{\text{life}}$ | 0.890 | 0.085 |
| $C_{\text{loss-unit}}$ | 0.792 | 0.161 |
| $R_{\text{SCR}}$ | 0.857 | 0.111 |
| $\eta_{\text{absorb}}$ | 0.879 | 0.094 |
| $\delta_{\text{U}}$ | 0.870 | 0.100 |
| $M_{\text{VIF}}$ | 0.872 | 0.099 |
| $T_{\text{f-recover}}$ | 0.886 | 0.088 |
| $R_{\text{en-trip}}$ | 0.887 | 0.087 |
| $U_{\text{L}}$ | 0.893 | 0.082 |