

基于复合指标的新能源场站分布式调相机 优化配置方法

周煜¹, 王东阳², 李志强², 金鑫³, 许国瑞³

(1. 国家电网有限公司华北分部, 北京市 西城区 100053;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192;

3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Configuration Method of Distributed Synchronous Condenser in New Energy Stations Based on Composite Index

ZHOU Yu¹, WANG Dongyang², LI Zhiqiang², JIN Xin³, XU Guorui³

(1. North China Branch of State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100053, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: In large-scale new energy outgoing transmission systems, many new energy power plants and collection stations are involved, and the power grid structure is highly intricate. This complexity gives rise to the situation where the multiple renewable energy stations short circuit ratio(MRSCR) fails to reach the standard requirements. Regarding the configuration of distributed synchronous condensers within new energy power plants to elevate the short-circuit ratio, two aspects are usually involved: the site selection of synchronous condensers and the capacity configuration. Based on the comprehensive compensation demand degree of node MRSCR and the predicted value of synchronous condenser configuration capacity, this paper proposes a composite index-based method to configure distributed synchronous condensers. This method considers both the site selection and capacity determination of synchronous condensers. The specific implementation plan is as follows: firstly, the MRSCR of each node in the new energy power grid and the interaction factor between nodes are calculated, and the comprehensive compensation demand degree index of the MRSCR for each new energy station is obtained; then, the node with the most significant comprehensive compensation demand degree index of the MRSCR is selected to configure the synchronous condenser and the required synchronous condenser capacity is determined. The MRSCR is recalculated after the configuration of the synchronous condenser until the target is met. Finally, a

simulation model of a high proportion new energy-sending end system is established, and the improving effect of different configuration methods on the MRSCR is studied and the effectiveness of the composite index-based optimization configuration method for distributed synchronous condensers is verified.

KEY WORDS: new energy; multiple renewable energy station short circuit ratio; synchronous condenser; composite index; optimal configuration method

摘要: 在大规模新能源外送系统中, 新能源场站和汇集站数量众多, 电网结构复杂, 进而导致新能源多场站短路比低于标准要求。在新能源场站配置分布式调相机来提升新能源场站短路比时, 通常会涉及到调相机选址和容量配置 2 个方面。基于节点短路比综合补偿需求度和调相机配置容量提出了基于复合指标的分布式调相机配置方法。该方法同时考虑调相机选址和定容 2 个方面, 具体实施方案是在调相机配置过程中, 首先, 通过计算新能源电网各节点的短路比及节点之间的交互作用因子, 获得各新能源场站短路比综合补偿需求度指标; 然后, 选择短路比综合补偿需求度最高的节点配置调相机并计算调相机容量, 通过计算各节点的短路比并重复上述配置过程直到所有节点短路比满足要求。最后, 搭建了高比例新能源送端系统仿真模型, 研究不同配置方法对新能源场站短路比的提升效果, 验证了基于复合指标的分布式调相机优化配置方法的有效性。

关键词: 新能源; 新能源多场站短路比; 同步调相机; 复合指标; 优化配置方法

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23B20130)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U23B20130).

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1683

0 引言

随着“双碳”战略的推进,我国电力系统逐步呈现出“双高”态势^[1],特别是在陆上风力和太阳能资源丰富的三北地区,新能源发电比重不断提高,在新能源占比较高的地区,电网强度较低,电压支撑能力较弱,导致新能源机组实际出力较低,外送能力受限^[2-5]。因此,需要通过接入一定的动态无功补偿设备^[6-8]来提升高比例新能源电网的电压支撑能力。

目前,新能源场站采用的动态无功补偿装置包括:静止型动态无功补偿装置(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)和分布式调相机^[9]等。分布式调相机具有瞬时无功响应速度快、过载能力强^[10-13]、无功输出能力受系统电压影响较小的特点,因此,分布式调相机正逐渐大规模应用于新能源场站。新能源场站加装分布式调相机后,系统的短路比会明显提升,从而有利于提升新能源的外送能力。现有文献在分布式调相机的选址方面进行了较多的研究^[14-17],对于容量配置方面的具体计算指标研究较少,大多是通过特定的目标以及优化算法来求解对应的配置容量。文献[18]根据在短路比最低的节点配置调相机可提升电网电压支撑强度这一结论,提出了一种分布式/集中式调相机混合配置方法,可以实现接入较少容量的调相机,进而显著提升新能源电网电压支撑强度;文献[19]对比了调相机集中和分散配置对换流母线和并网点电压的影响,得出在新能源场站低压侧分散配置调相机可有效缓解系统暂态过电压,且经济性也会得到明显提升;文献[20]从多馈入直流相互作用的角度出发,考虑多馈入交互作用因子、多馈入有效短路比及相对暂态电压跌落面积指标,提出了一种适用于调相机的动态无功补偿布点方法,此方法可显著提高直流受端网架强度,提高直流输电系统的安全稳定运行能力;文献[21]从多馈入直流系统换相失败出发,构建了多馈入直流系统换相安全综合裕量指标,并在此基础上提出了同步调相机布点选取方法,此调相机布点选取方法可有效降低换相失败风险;文献[22]将调相机的配置经济成本和暂态电压跌落水平最小作为优化目标,将直流换相失败风险作为约束条件,构建了调相机配置容量优化模型,进而可通过粒子群优化算法求解调相机配置容量;文献[23]利用灰色关联分析法计算不同电气参数与暂态过电压的关联程度,并将其作为权重,提出了电气参数加权占比容量配置依据指标,利用该

指标和过电压水平为约束进一步研究分布式调相机容量配置方案。

现有文献在研究新能源场站的调相机配置时往往将选址和定容分开来单独分析,没有针对实际的新能源电网中分布式调相机的具体配置方法。因此,亟需一种综合考虑调相机选址和定容2个方面的配置方法,并且能够应用于实际新能源电网中的分布式调相机配置。本文的创新点是将新能源场站短路比相对补偿值与各场站的交互作用因子结合,定义了基于节点短路比综合补偿需求度和调相机配置容量预测值的复合指标,提出了基于复合指标的分布式调相机优化配置方法,实现配置最小容量调相机以满足新能源场站短路比的要求。故本文通过分析调相机接入对新能源多场站短路比的影响机理,将节点短路比相对补偿值与交互作用因子结合,定义了基于节点短路比综合补偿需求度和调相机配置容量预测值的复合指标,在此基础上研究了基于复合指标的分布式调相机优化配置方法,通过该配置方法,可以实现配置较少容量的调相机从而使所有节点的短路比达到要求;搭建高比例新能源送端系统仿真模型,研究了不同配置方法对新能源场站短路比的提升效果,验证了基于复合指标的分布式调相机优化配置方法的有效性。本文的优势在于提出了同时考虑分布式调相机选址和定容的配置方法,为新能源电网合理配置分布式调相机提供了理论基础和技术支持。

1 调相机接入对短路比的影响机理分析

1.1 调相机接入对短路容量的影响

如图1所示,新能源场站短路容量是该节点发生三相短路时,流入节点的短路电流与节点额定电压的乘积,当调相机未接入新能源场站时,节点的短路容量 S_{ac} 如式(1)所示。

$$S_{ac} = \sqrt{3}U_N I_k = \sqrt{3}U_N \frac{E}{Z_S + Z_T} \quad (1)$$

式中: Z_S 为系统侧等值阻抗; Z_T 为新能源场站机端母线升压变压器阻抗; U_N 为节点的额定电压; I_k 为流入节点的短路电流; E 为系统等值电势。

当调相机接入新能源场站35kV母线时,如图2所示,可以将调相机支路与系统侧支路并联,节点的短路容量如式(2)所示。

$$S'_{ac} = \sqrt{3}U_N \frac{E}{Z_S // (Z_{T1} + Z_{SC}) + Z_T} = \sqrt{3}U_N \frac{E}{\frac{Z_S(Z_{T1} + Z_{SC})}{Z_S + (Z_{T1} + Z_{SC})} + Z_T} \quad (2)$$

式中： Z_{T1} 为变压器阻抗； Z_{SC} 为调相机支路阻抗。

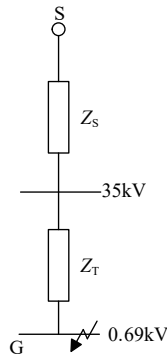


图 1 调相机未接入示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the unconnected condenser

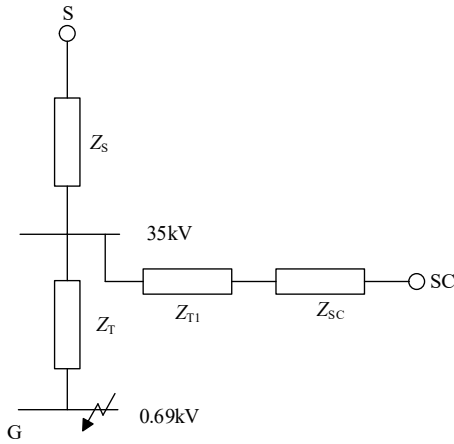


图 2 调相机接入示意图

Fig. 2 Synchronizer access schematic diagram

对比式(1)和式(2)可知，调相机接入新能源场站后，等效阻抗减小，短路电流增大。因此，调相机接入新能源场站时，节点的短路容量增大，节点电压支撑强度提升。

1.2 调相机接入后节点短路比

新能源多场站短路比 (multiple renewable energy stations short circuit ratio, MRSCR)(记为 R_{MRSCR}) 与多馈入短路比 (multi-infeed short circuit ratio, MISCR)(记为 R_{MISCR}) 的形式相同，用于表征计及多个新能源场站相互影响时，各新能源场站的电压支撑强弱^[24]。根据如图 3 所示的新能源外送系统，可以得出各新能源场站的短路比。以场站 p 为例，其短路比如式(3)所示。

$$R_{MRSCRp} = \frac{S_{acp}}{P_{rep} + \sum_{q=1, q \neq p}^n \left| \frac{Z_{cqpq}}{Z_{cqp}} \right| P_{req}} = \frac{U_{Np} E / |Z_{cqp}|}{P_{rep} + \sum_{q=1, q \neq p}^n \left| \frac{Z_{cqpq}}{Z_{cqp}} \right| P_{req}} = \frac{S_{acp}}{S_{cp}} \quad (3)$$

式中： S_{acp} 为新能源场站节点 p 的短路容量； P_{rep}

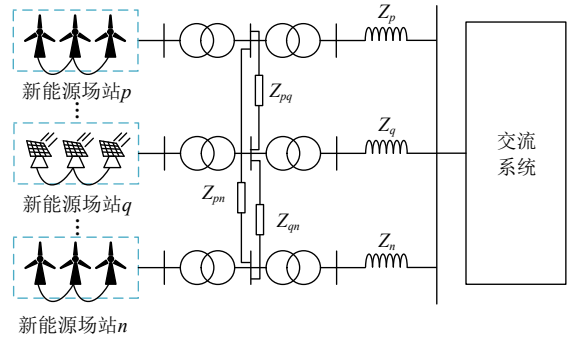


图 3 新能源外送结构图

Fig. 3 New energy delivery structure diagram

和 P_{req} 为新能源场站节点 p 、 q 的有功出力； Z_{cqp} 为节点 p 的等效自阻抗； Z_{cqpq} 为节点 p 、 q 之间的等效互阻抗； S_{cp} 为新能源场站节点 p 的等效容量。

以如图 4 所示的节点 p 为例，当调相机接入电网时，相当于并联电感支路接入电网^[18]。调相机接入后，节点自阻抗和互阻抗会发生变化，等效自阻抗如式(4)所示，等效互阻抗如式(5)所示。

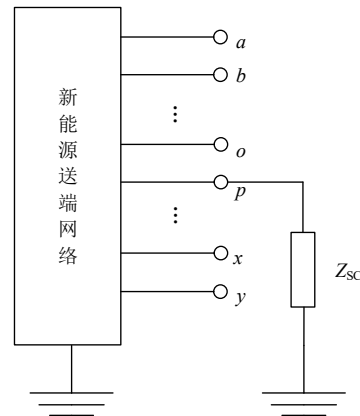


图 4 调相机接入新能源送端网络

Fig. 4 Condenser access to new energy sending end network

$$Z'_{cqp} = Z_{cqp} - \frac{Z_{cqp} Z_{cqp}}{Z_{cqp} + Z_{SC}} \quad (4)$$

$$Z'_{cqpq} = Z_{cqpq} - \frac{Z_{cqp} Z_{cqpq}}{Z_{cqp} + Z_{SC}} \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可知，当调相机接入后，等效节点阻抗矩阵中的自阻抗和互阻抗均会减小，根据节点等效阻抗矩阵的定义，节点等效自阻抗大于节点之间的等效互阻抗，因此，可以进一步得出调相机接入新能源场站后，节点等效自阻抗的减少量比节点等效互阻抗的减少量大。

将式(4)和式(5)代入式(3)计算调相机接入后的新能源多场站短路比如式(6)所示，当调相机接入新能源场站后，节点等效自阻抗和节点等效互阻抗均会减小，各个新能源场站有功出力保持不变，进而得出节点短路比增大。

$$R'_{MRSCR_p} = \frac{U_{Np} E}{P_{rep} |Z'_{cqpp}| + \sum_{q=1, q \neq p}^n |Z'_{cqpq}| P_{req}} \quad (6)$$

2 新能源多场站短路比复合指标

2.1 短路比综合补偿需求度

根据电力系统安全稳定计算规范规定, 新能源场站机端节点短路比不应低于临界最低短路比值 $R_{MRSCR_{min}}$ ^[25], 以 $R_{MRSCR_{min}}$ 作为短路比提升目标值, 根据新能源多场站短路比可以得出节点的短路比相对补偿值, 用于表征节点短路比提升的需求程度, 需求程度越高的节点越需要加装调相机, 如式(7)所示。

$$\delta_i = \frac{(R_{MRSCR_{min}} - R_{MRSCR_i})}{R_{MRSCR_i}} \quad (7)$$

由于节点对应的 35kV 母线加装调相机后, 不仅会提升本节点的短路比, 同时也会对相邻节点的短路比有一定程度的提升, 为了使调相机对本节点和相邻节点短路比提升效果达到最优, 须将相邻节点的短路比相对补偿值归算到本节点。因此, 采用多场站交互作用因子(wind plant interaction factor, WPIF)^[26](记为 F_{WPIF})来表示节点之间的短路比相互影响程度, WPIF 表征节点 i 的电压下降 1%时, 节点 j 的电压变化率, 它衡量节点 i 和节点 j 之间的电压波动关联程度, 见式(8)。而短路比与电压波动有关, 进而短路比相对补偿值也与电压波动有关, 因此可采用 WPIF 表征相邻节点的短路比相对补偿值的关联程度, WPIF 越大, 代表相邻节点之间短路比相对补偿值相互影响越大, 因此, 可将 WPIF 作为节点之间短路比相对补偿值的归算系数。

$$F_{WPIF_{ji}} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \approx \frac{|Z_{ij}|}{|Z_{ii}|} \quad (8)$$

推导出节点短路比相对补偿值和节点间的归算系数后, 将所有节点的短路比相对补偿值归算到一个节点处, 得出节点短路比综合补偿需求度, 表征调相机加装节点及相邻节点对调相机的综合需求程度, 短路比综合补偿需求度越高的节点, 越需要安装调相机, 安装之后对系统整体短路比提升效果越大, 根据式(7)和式(8)得出节点短路比综合补偿需求度, 如式(9)所示。

$$\lambda_i = (\delta_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n (F_{WPIF_{ji}} \delta_j)) \frac{100\%}{S_{ei}} \quad (9)$$

式中: S_{ei} 为新能源场站节点 i 的等效容量。

2.2 调相机配置容量预测

当调相机接入新能源场站后, 会降低节点的自

阻抗和节点之间的互阻抗, 进而会增大节点的短路容量, 同时节点短路比的分子也会发生变化。由于大型新能源基地中, 新能源场站数量众多, 调相机对节点的等效容量影响较小, 因此, 本文只计及调相机接入时短路容量的变化, 进一步, 可以根据调相机接入前后的短路比的差值计算出节点短路容量的增加量, 如式(10)所示。

$$\Delta S_{ac} = (R'_{MRSCR_p} - R_{MRSCR_p}) S_c \quad (10)$$

式中: R'_{MRSCR_p} 为调相机接入后节点的短路比; R_{MRSCR_p} 为调相机接入前节点的短路比; S_c 为节点的等效容量。

根据式(1), 可以求解节点的短路容量如式(11)所示。

$$S_{aci} = \sqrt{3} \frac{E}{|Z_{eqii}|} U_{Ni} = \sqrt{3} I_{ki} U_{Ni} \quad (11)$$

式中: Z_{eqii} 为经过多端口戴维南等值后节点 i 到系统侧的的等值阻抗; U_{Ni} 为节点 i 的额定电压。

根据式(11)可以得出节点短路容量的变化量与短路电流的关系, 如式(12)所示。

$$\Delta S_{aci} = S'_{aci} - S_{aci} = \sqrt{3} I'_{ki} U_{Ni} - \sqrt{3} I_{ki} U_{Ni} = \sqrt{3} (I'_{ki} - I_{ki}) U_{Ni} \quad (12)$$

因此, 调相机接入后节点短路容量的增加量来自于调相机支路所提供的短路容量。可以进一步计算出调相机支路提供的短路电流标么值, 如式(13)所示。

$$I_{SC}^* = \frac{\Delta S_{ac}}{\sqrt{3} U_N} \frac{\sqrt{3} U_B}{S_B} = \frac{\Delta S_{ac}}{S_B} \quad (13)$$

式中: U_N 为节点额定电压, 通常与节点的基准电压相同; S_B 为系统基准容量。

求解出调相机支路的短路电流后, 如图2所示, 需要求解出在机端节点发生三相短路期间的新能源场站机端母线升压变压器高压侧 35kV 母线的电压。首先要求解机端母线升压变压器支路的短路电流标么值, 可以根据调相机接入后节点的短路容量计算, 如式(14)所示。

$$I_T^* = \frac{R'_{MRSCR_p} S_c \sqrt{3} U_B}{\sqrt{3} U_N S_B} = \frac{R'_{MRSCR_p} S_c}{S_B} \quad (14)$$

根据式(14), 进一步计算出机端母线升压变压器高压侧母线电压标么值, 如式(15)所示。

$$U_{h, bus}^* = I_T^* Z_T^* \quad (15)$$

如图2所示调相机接入示意图, 根据调相机内电势与新能源场站 35kV 母线电压的电压差进一步求解出调相机支路的阻抗, 由于调相机支路电抗分

量远大于电阻分量，因此，本文只考虑调相机支路的电抗分量，如式(16)所示。

$$X_{B_SC}^* = \frac{E_{SC}^* - U_{h_bus}^*}{I_{SC}^*} \quad (16)$$

式中： $X_{B_SC}^*$ 为调相机支路电抗，包括变压器电抗和调相机电抗； E_{SC}^* 为调相机内电势。

根据式(16)进一步求解出调相机的电抗，即

$$X_{SC}^* = X_{B_SC}^* - X_{T1}^* \quad (17)$$

式中： X_{SC}^* 为调相机电抗； X_{T1}^* 为调相机支路变压器电抗。

根据式(17)可以求解出以系统容量为基准值的调相机电抗标幺值，需要换算为以调相机额定容量为基准值的电抗标幺值，如式(18)所示。

$$X_{N_SC}^* = X_{SC}^* \frac{U_B^2 S_N}{S_B U_N^2} = X_{SC}^* \frac{S_N}{S_B} \quad (18)$$

式中： $X_{N_SC}^*$ 是以调相机额定容量为基准值的调相机电抗标幺值； S_N 为调相机额定容量； U_N 为调相机额定电压。

根据式(18)可以进一步计算出调相机配置容量预测值，如式(19)所示。

$$S_N = \frac{X_{N_SC}^* S_B}{X_{SC}^*} \quad (19)$$

本文所提出的短路比综合补偿需求度 λ_i 和调相机配置容量预测值 S_N 共同构成了用于分布式调相机选址定容的复合指标。其中，短路比综合补偿需求度 λ_i 用于调相机的选址，调相机配置容量预测值 S_N 用于调相机的容量配置。

3 实际算例验证

3.1 基于复合指标的调相机配置方法

根据上文得出的复合指标，本文设计了基于复合指标的调相机优化配置方法，具体配置流程如图5所示。

由图5所示，首先根据初始短路比，节点阻抗矩阵以及等效容量等参数计算所有节点的短路比综合补偿需求度 λ_i ，然后选择短路比综合补偿需求度最大的节点，计算该节点的调相机配置容量预测值 S_N 从而确定需要配置的调相机容量。配置调相机后，重新计算各个节点的短路比，判断所有节点短路比是否都达到1.5，若存在短路比小于1.5的节点，则重复上述过程，直到所有新能源场站机端节点短路比符合要求。

本文以图6所示的某新能源外送基地电网架构，对基于复合指标的调相机优化配置方法进行验

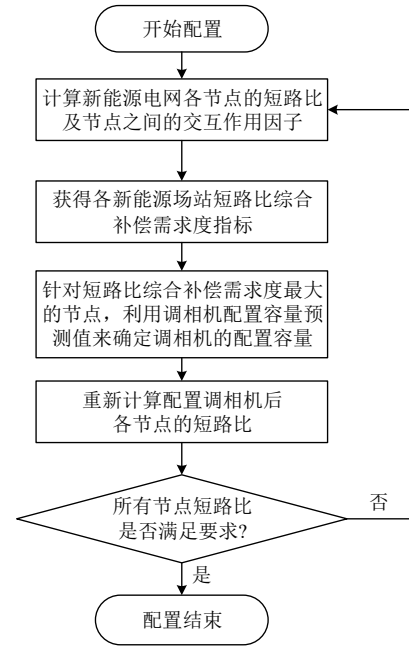


图5 调相机优化配置方法流程

Fig. 5 Flowchart of optimization configuration method for synchronous condenser

证。搭建了包含3个汇集站的新能源送端系统模型，每个汇集站分别包含3个新能源风电场，总装机600MW，共9个新能源场站机端节点。具体接线情况为汇集站1：新能源G1，新能源G2，新能源G3；汇集站2：新能源G4，新能源G5，新能源G6；汇集站3：新能源G7，新能源G8，新能源G9。各新能源场站经35kV/220kV升压变升压后送出到汇集站。根据系统参数计算9个新能源场站机端节点的短路容量、初始短路比及每个节点的短路比综合补偿需求度 λ_i ，如表1所示。

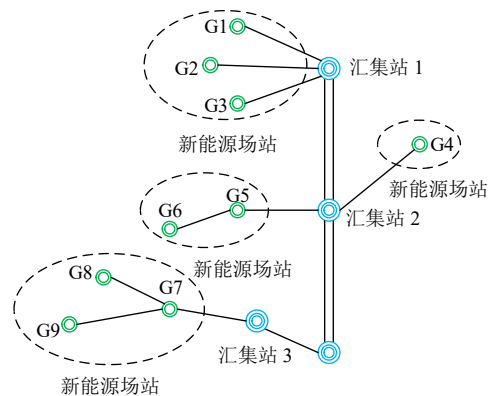


图6 新能源电网架构图

Fig. 6 New energy grid architecture diagram

选择 λ_i 最大的机端节点6对应的35kV母线作为调相机的配置母线，同时计算节点6的调相机配置容量预测值为50.9Mvar。因此，选择50Mvar的调相机配置到节点6对应的35kV母线。然后逐次迭代配置，最终配置方案如表2所示。

经过7轮迭代配置，新能源场站各节点短路比

的变化情况如表 3 和图 7 所示。

表 1 新能源场站机端节点编号及短路比参数
Table 1 Renewable energy station terminal node number and short circuit ratio parameters

节点名	编号	装机容量/MW	短路容量/MVA	MRSCR	λ_i
新能源 G1	1	100	475.23	1.26	0.079
新能源 G2	2	50	316.05	1.40	0.042
新能源 G3	3	100	648.51	1.23	0.062
新能源 G4	4	50	345.74	1.49	0.018
新能源 G5	5	100	470.24	1.43	0.027
新能源 G6	6	50	258.34	1.08	0.216
新能源 G7	7	50	373.25	1.24	0.095
新能源 G8	8	50	264.05	1.08	0.212
新能源 G9	9	50	413.58	1.28	0.0873

表 2 基于复合指标的配置方案
Table 2 Configuration scheme based on composite index

迭代次数	节点	容量/Mvar
第 1 轮	6	50
第 2 轮	8	30
第 3 轮	7	30
第 4 轮	3	50
第 5 轮	1	20
第 6 轮	2	10
第 7 轮	9	10

表 3 基于复合指标配置后节点短路比
Table 3 Node short circuit ratio based on composite index configuration

节点	0	1	2	3	4	5	6	7
1	1.26	1.28	1.29	1.35	1.38	1.66	1.67	1.68
2	1.40	1.41	1.41	1.42	1.43	1.43	1.67	1.67
3	1.23	1.25	1.26	1.27	1.56	1.58	1.58	1.59
4	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53	1.53	1.60	1.60
5	1.43	1.44	1.45	1.45	1.46	1.47	1.53	1.53
6	1.08	1.80	2.02	2.06	2.11	2.14	2.14	2.18
7	1.24	1.26	1.28	1.64	1.68	1.76	1.77	1.78
8	1.08	1.20	1.82	1.86	1.91	1.93	1.94	1.97
9	1.28	1.33	1.36	1.38	1.41	1.42	1.42	1.58

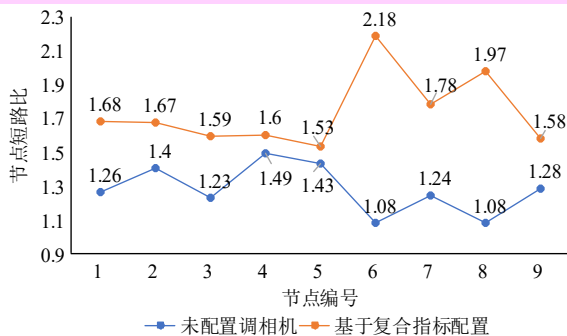


图 7 基于复合指标配置的短路比变化

Fig. 7 Short circuit ratio variation diagram based on composite index configuration

由表 3 可知，采用基于复合指标的调相机配置方法后，节点短路比均满足大于 1.5 的要求。由图 7 可见，未配置调相机时，新能源场站各个节点的短路比均小于 1.5，根据复合指标配置 7 台总容量为 200Mvar 的调相机后，各个节点的短路比均大

于 1.5。

3.2 基于最低短路比的调相机配置方法

现有文献通过分析调相机接入不同的 35kV 侧母线对自阻抗和互阻抗的影响，得出在短路比最低的节点配置调相机后节点短路比提升幅度最大^[18]。因此，针对调相机选址的配置方法采用最低短路比的调相机配置方法，即按照节点短路比大小进行排序，选择在短路比最低的节点配置调相机，然后再一次计算各个节点短路比，重新排序并选择短路比最低的节点配置调相机，不断按照上述流程迭代配置，直到所有节点短路比符合要求为止。

最低短路比配置方法缺少容量配置指标，因此，通常会通过 2 种方式来确定调相机的容量，一种是采用相同容量型号的调相机配置，另一种是在每个节点用不同容量的调相机试验，但是这种方法计算量大，不适用于实际电网中的调相机配置。本文结合上述 2 种方法，在开始配置调相机时，统一配置 50Mvar 调相机，当短路比接近 1.5 时，则降低调相机容量，通过不断尝试，直到满足系统各节点短路比要求为止。根据上述方法，得出基于最低短路比的调相机配置方案如表 4 所示。

表 4 基于最低短路比的配置方案
Table 4 Configuration scheme based on minimum short circuit ratio

迭代次数	节点	容量/Mvar
第 1 轮	6	50
第 2 轮	8	50
第 3 轮	3	50
第 4 轮	7	50
第 5 轮	1	50
第 6 轮	2	10
第 7 轮	9	10

经过 7 轮迭代，各个节点的短路比变化情况如表 5 所示。由表 5 可以看出，采用基于最低短路比的配置方法配置 7 台总容量为 270Mvar 的调相机后，所有节点的短路比均满足大于 1.5 的要求。

对比表 2 和表 4 的配置方案可知，基于复合指标的配置方法要比基于最低短路比的配置方法减少了 70Mvar 的调相机配置容量。

根据运行经验，新能源场站配置调相机后，各个节点的短路比在满足大于 1.5 的同时应尽量均衡，不宜出现个别节点短路比过高的情况。图 8 所示为不同配置方法情况下，各节点短路比在调相机安装前后的变化情况；其中基于复合指标配置方法的平均短路比 R_{MRSCR1} 达到 1.621 时即可满足所有节点短路比满足系统最低要求，而基于最低短路比配置方法的平均短路比 R_{MRSCR2} 须达到 1.824 才能

表 5 基于最低短路比配置后节点短路比
Table 5 Node short circuit ratio based on the minimum short circuit ratio configuration

节点	0	1	2	3	4	5	6	7
1	1.26	1.28	1.29	1.32	1.40	1.92	1.92	1.94
2	1.40	1.41	1.41	1.42	1.43	1.44	1.67	1.68
3	1.23	1.25	1.26	1.54	1.57	1.59	1.60	1.61
4	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53	1.54	1.61	1.61
5	1.43	1.44	1.45	1.46	1.47	1.47	1.53	1.53
6	1.08	1.80	2.06	2.12	2.16	2.20	2.21	2.25
7	1.24	1.26	1.28	1.30	1.82	1.95	1.96	1.98
8	1.08	1.20	2.05	2.10	2.15	2.19	2.19	2.23
9	1.28	1.33	1.36	1.39	1.42	1.44	1.44	1.60

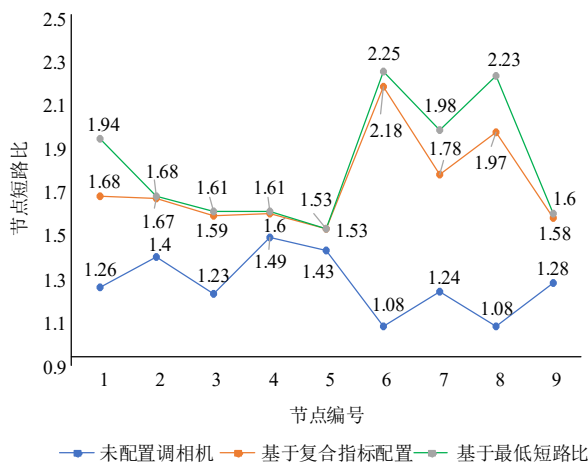


图 8 2种配置方法短路比提升效果对比

Fig. 8 Comparison of short circuit ratio improvement effect with two configuration methods

保障所有节点短路比满足系统最低要求。

综合可知，在满足系统必要短路比的情况下，基于复合指标的配置方法比最低短路比配置方法所需的调相机总容量更小，对各节点短路比的提升更为均衡，因此更具经济优势。

需要指出的是，由于新能源场站的实际出力随时间波动，因此各个场站的短路比也在随着新能源出力在不断变化，根据式(3)可知，当新能源场站出力越大，短路比越低。因此，本文中的短路比均指新能源场站保持最大出力时的计算值，即基于短路比最低的工况下进行分布式调相机配置。

3.3 2种配置方法选址结果对比

2种配置方法最终得出的选址节点是相同的，但是配置过程中调相机的安装顺序不同。因此，本文比较了2种配置方法因选址顺序的不同而对各个节点短路比提升效果的影响。具体验证方案是将复合指标中的调相机配置容量预测值与最低短路比配置方法结合，即上述2种配置方法都采用调相机配置容量预测值，对比不同的选址顺序对节点短路比的影响，2种方案调相机配置顺序如表6所示。

表 6 基于容量预测值的2种配置方案

Table 6 Configuration scheme for two methods based on capacity forecast values

迭代次数	复合指标配置节点	最低短路比配置节点	容量/Mvar
第1轮	6	6	50
第2轮	8	8	30
第3轮	7	3	50
第4轮	3	7	30
第5轮	1	1	20
第6轮	2	9	10
第7轮	9	2	10

由表6可见，2种方法在第3、6轮的调相机选址节点不同。基于容量预测值得最低短路比配置方法在7轮迭代过程中各个节点的短路比变化情况如表7所示。

表 7 基于容量预测值的最低短路比配置后各个节点短路比
Table 7 Minimum short-circuit ratio configuration based on capacity forecast value for each node's short-circuit ratio

节点	0	1	2	3	4	5	6	7
1	1.26	1.28	1.29	1.31	1.38	1.66	1.68	1.68
2	1.40	1.41	1.41	1.42	1.43	1.43	1.44	1.67
3	1.23	1.25	1.26	1.53	1.56	1.58	1.59	1.59
4	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53	1.53	1.54	1.60
5	1.43	1.44	1.45	1.46	1.46	1.47	1.47	1.53
6	1.08	1.80	2.02	2.08	2.11	2.14	2.18	2.18
7	1.24	1.26	1.28	1.30	1.68	1.76	1.78	1.78
8	1.08	1.20	1.82	1.87	1.91	1.93	1.97	1.97
9	1.28	1.33	1.36	1.39	1.41	1.42	1.58	1.58

由表6可知，2种配置方法的不同主要体现在第3轮和第6轮，因此进一步对比了这2次选址结果对节点短路比提升效果的影响。在某节点配置调相机后，不仅可以提高该节点自身的短路比，还能提升相邻节点的短路比。为了分析选址顺序对所有节点短路比提升效果的影响，计算了2种方法在第3轮、第6轮的调相机配置对各节点短路比的总体提升量。第3轮配置基于复合指标配置方法对各节点短路比提升总和为0.55，最低短路比配置方法对各节点短路比提升总和为0.48；第6轮配置基于复合指标配置方法对各节点短路比提升总和为0.4，最低短路比配置方法对各节点短路比提升总和为0.31。图9、10所示为第3轮、第6轮配置前后各个节点短路比的变化情况。

根据上述计算结果可以看出，在相同配置容量下，基于复合指标的配置方案对各节点短路比总体提升幅度优于基于最低短路比的配置方案，能够使系统中各节点的短路比得到更为全面、均衡的改善。

4 结论

本文针对新能源场站分布式调相机的优化配

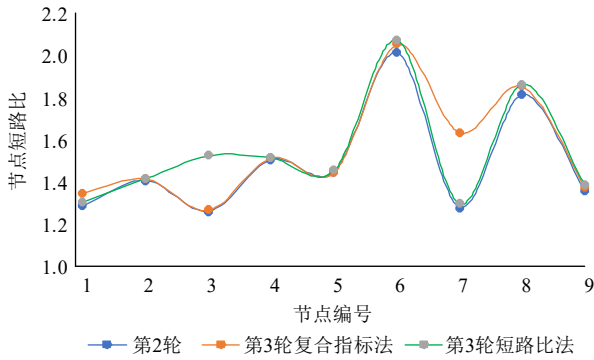


图9 2种配置方法第3轮迭代短路比提升对比

Fig. 9 Comparison of the improvement of the third round iterative short circuit ratio of the two configuration methods

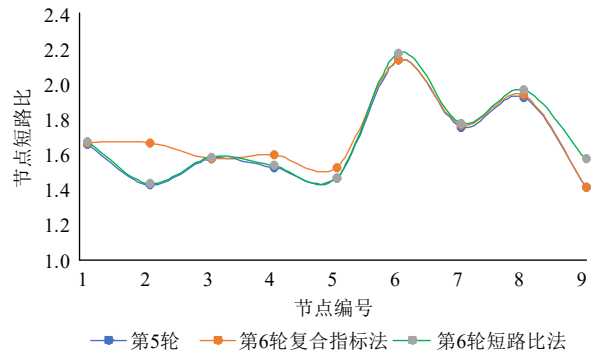


图10 2种配置方法第6轮迭代短路比提升对比

Fig. 10 Comparison of the improvement of the sixth round iterative short circuit ratio of the two configuration methods

置方法开展研究,提出了能够提升新能源场站整体短路比的调相机配置复合指标,获得了分布式调相机在新能源场站的最优配置方案。具体结论如下:

1) 为获得短路比提升需求程度最高的新能源场站,将新能源场站短路比相对补偿值与交互作用因子相结合,提出了新能源场站的短路比综合补偿需求度 λ_i ;新能源场站的短路比综合补偿需求度越大,配置调相机后对本场站和相邻场站的短路比提升越明显。

2) 基于节点短路比综合补偿需求度和调相机配置容量预测值 S_N ,提出了基于 λ_i 和 S_N 复合指标的分布式调相机配置方法,采用该方法可在配置最少容量的调相机的情况下使得系统整体短路比提升最大,满足技术性和经济性的双重要求。

3) 基于装机容量为600MW的新能源汇集电网,研究了基于复合指标和最低短路比指标的调相机配置方案,得出基于复合指标的调相机配置容量比最低短路比指标配置方案小70Mvar,且基于复合指标配置调相机的方法使得各节点的短路比更加均衡。

参考文献

[1] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等. 新型电力系统的六要素分析[J].

电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
 KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Six Elements Analysis of New Power Systems[J]. Power Grid Technologies, 2023, 47(5): 1741-1750(in Chinese).
 [2] 陈博,王亮,张冰,等. 特高压交直流混联新能源高比例渗透背景下受端电网电压稳定问题探讨[J]. 山东电力技术, 2020, 47(6): 36-40.
 CHEN Bo, WANG Liang, ZHANG Bing, et al. Discussion on voltage stability of receiving-end power grid under the background of high penetration of UHV AC/DC hybrid new energy[J]. Shandong Electric Power Technology, 2020, 47(6): 36-40(in Chinese).
 [3] 李佳蔚,张冠宇. 大规模分布式新能源接入对省级电网稳定性影响[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 174-180.
 LI Jiawei, ZHANG Guanyu. The impact of large-scale distributed new energy access on the stability of provincial power grids[J]. China Electric Power, 2024, 57(6): 174-180(in Chinese).
 [4] 邓宏远,黄永章,王哲凡,等. 新能源同步机对光伏发电系统静态电压稳定性的提升作用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(2): 117-125.
 DENG Hongyuan, HUANG Yongzhang, WANG Zhefan, et al. Research on the improvement of static voltage stability of photovoltaic power generation system by new energy synchronous machine[J]. Power capacitors and reactive power compensation, 2024, 45(2): 117-125(in Chinese).
 [5] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(01): 20-27.
 CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Research on the technical bottleneck of new energy development[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 37(1): 20-27(in Chinese).
 [6] 王博,王永辉,宋广磊,刘冰. 动态无功补偿装置的能力比较[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 18-26.
 WANG Bo, WANG Yonghui, SONG Guanglei, LIU Bing. Ability comparison of dynamic reactive power compensation devices [J]. Power capacitors and reactive power compensation, 2022, 43(5): 18-26(in Chinese).
 [7] 高洁,王彤,赵伟,等. 提升电力系统安全稳定水平的风电光伏场站主动支撑技术发展及展望综述[J]. 新型电力系统, 2024, 2(2): 201-222.
 GAO Jie, WANG Tong, ZHAO Wei, et al. Development and prospect of active support technology for wind power photovoltaic station to improve the safety and stability of power system[J]. New power system, 2024, 2(2): 201-222(in Chinese).
 [8] 金楚,李作红,葛景,等. 交直流混联受端电网动态无功规划研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(1): 12-17.
 JIN Chu, LI Zuohong, GE Jing, et al. Research on dynamic reactive power planning of AC/DC hybrid receiving-end power grid[J]. Power capacitors and reactive power compensation, 2022, 43(1): 12-17(in Chinese).
 [9] 王蒙,李庆海,葛景,等. 提升新能源送出能力的多类型无功补偿装置优选[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4): 8-13+21.
 WANG Meng, LI Qinghai, GE Jing, et al. Optimization of multi-type reactive power compensation devices to improve the delivery capacity of new energy[J]. Power capacitor and reactive power compensation, 2021, 42(4): 8-13+21(in Chinese).
 [10] 郭强,李志强. 同步调相机发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6050-6064.
 GUO Qiang, LI Zhiqiang. A review of synchronous condenser development[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2023, 43(15): 6050-6064(in Chinese).
 [11] 省天骄,李积泰,权慧娟,等. 适应高比例新能源直流外送输电能力提升的分布式调相机配置方法研究[J]. 青海电力, 2023, 42(2): 1-7.

- SHENG Tianjiao, LI Jitai, QUAN Huijuan, et al. Research on the configuration method of distributed synchronous condenser adapted to the improvement of high proportion of new energy DC transmission capacity[J]. Qinghai Electric Power, 2023, 42(2): 1-7(in Chinese).
- [12] 孙双魁, 施俊俊, 张存朝, 等. 新型分布式调相机动态性能参数自适应优化[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(4): 91-98.
- SUN Shuangkui, SHI Junjun, ZHANG Cunchao, et al. Adaptive optimization of dynamic performance parameters of new distributed synchronous condenser[J]. Grid and clean energy, 2023, 39(4): 91-98(in Chinese).
- [13] 李志强, 何凤军, 郭强, 等. 青南新能源集中送出地区动态无功补偿方案对比研究[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 87-93.
- LI Zhiqiang, HE Fengjun, GUO Qiang, et al. Comparative Study on Dynamic Reactive Power Compensation Schemes in Qingnan New Energy Concentrated Transmission Area[J]. Modern Power, 2021, 38(1): 87-93(in Chinese).
- [14] 沈广进, 郭俊辉, 常俊晓, 等. 同步约束下新能源基地调相机优化选址算法[J]. 计算机仿真, 2024, 41(5): 94-101.
- SHEN Guangjin, GUO Junhui, CHANG Junxiao, et al. Condenser optimization location algorithm for new energy base under synchronization constraints[J]. Computer simulation, 2024, 41(5): 94-101(in Chinese).
- [15] 刘铖, 胥冬洋, 武诚, 等. 考虑频率稳定约束的分布式调相机选址定容策略[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 106-114.
- LIU Cheng, XU Dongyang, WU Cheng, et al. A location and sizing strategy for distributed synchronous condensers considering frequency stability constraints[J]. Power Construction, 2023, 44(12): 106-114(in Chinese).
- [16] 杨金刚, 石振江, 何成明, 等. 提升高比例新能源送端电网暂态电压安全的调相机优化配置策略[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 174-182.
- YANG Jingang, SHI Zhenjiang, HE Chengming, et al. Optimal configuration strategy of synchronous condenser for improving transient voltage security of high-proportion new energy sending-end power grid[J]. Journal of Shandong University (Engineering Edition), 2024, 54(2): 174-182(in Chinese).
- [17] 简文, 周自强, 唐飞, 等. 抑制多馈入直流换相失败的同步调相机优化配置方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 169-177.
- JIAN Wen, ZHOU Ziqiang, TANG Fei, et al. Optimal configuration method of synchronous condenser for suppressing multi-infeed DC commutation failure[J]. High voltage technology, 2021, 47(1): 169-177(in Chinese).
- [18] 周莹坤, 孙华东, 徐式蕴, 等. 提升电网电压支撑强度的调相机优化配置方法[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3848-3856.
- ZHOU Yingkun, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. An Optimal Condenser Configuration Method for Enhancing Grid Voltage Support Strength[J]. Power Grid Technology, 2022, 46(10): 3848-3856(in Chinese).
- [19] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 124-129.
- SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on condenser configuration of large-scale new energy DC transmission system[J]. Power automation equipment, 2019, 39(9): 124-129(in Chinese).
- [20] 王强, 李天然, 唐小波, 等. 应对多馈入直流换相失败的同步调相机布点方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 222-227.
- WANG Qiang, LI Tianran, TANG Xiaobo, et al. Synchronous condenser placement method for multi-infeed DC commutation failure[J]. Power system automation, 2019, 43(1): 222-227(in Chinese).
- [21] 肖嘉辰, 郭春义, 丁银香. 多馈入直流系统换相安全综合裕量及同步调相机布点选取方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-12 [2024-08-23].
- XIAO Jiachen, GUO Chunyi, DING Yinxiang. Synthetical Commutation Security Margin in Multi-Infeed HVDC Systems and Synchronous Condensers Deployment Selection Method[J/OL]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2024: 1-12[2024-08-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240801.1609.009.html>(in Chinese).
- [22] 周宁, 孟倩戎, 张宇博, 等. 直流受端系统同步调相机容量自动优化配置方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12): 86-94.
- ZHOU Ning, MENG Qianrong, ZHANG Yubo, et al. An Automatic Capacity Optimization Method of the Synchronous Condenser for the DC Receiving-End System[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12): 86-94(in Chinese).
- [23] 张建坡, 孟凡, 吴林林, 等. 基于电气参数加权占比的新能源场站分布式调相机容量配置[J/OL]. 电网技术, 2023: 1-11[2024-09-25].
- ZHANG Jianpo, MENG Fan, WU Linlin, et al. Research on Distributed Condenser Capacity Configuration of New Energy Field Station Based on the Weighted Proportion of Electrical Parameters Index[J]. Power System Technology, 2023: 1-11[2024-09-25]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1063>(in Chinese).
- [24] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497-506.
- SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio of new energy multi-station[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 41(2): 497-506(in Chinese).
- [25] GB/T 40581-2021, 电力系统安全稳定计算规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- GB/T 40581-2021, Calculation specification for power system security and stability[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022(in Chinese).
- [26] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 499-515.
- YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Review of quantitative evaluation index of voltage support strength for power electronic equipment access[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 42(2): 499-515(in Chinese).



周煜

在线出版日期: 2024-12-06.

收稿日期: 2024-09-11.

作者简介:

周煜(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制、电网调度及仿真分析, E-mail: forevermint@126.com;

王东阳(1977), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为发电机控制与电网工程试验, E-mail: zgdky@hotmail.com;

李志强(1978), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统建模、调相机研发及工程应用等, E-mail: lizhiqiang78@126.com;

金鑫(2000), 男, 硕士研究生, 主要从事电网协调运行以及新能源电力系统稳定分析等方面的研究工作, E-mail: jinx1232024@163.com;

许国瑞(1986), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事大型发电机多物理场分析、电网协调运行以及新型发电机、调相机等方面的研究工作, E-mail: lingquan0624@163.com.

(责任编辑 马晓华)