

提升弱电网新能源集群送出能力的调相机优化配置方法

王泽森¹, 刘 苗¹, 李海波², 秦建茹², 郭金智¹, 白 恺¹

(1. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213)

摘要:针对提升送端弱电网系统强度及新能源消纳能力的技术需求,分析了短路比指标与新能源集群送出能力之间的关联;分析了调相机接入对短路比指标的影响;建立了兼顾弱电网系统强度和集群新能源消纳的调相机配置双层优化模型,内层模型以各新能源场站出力最大为目标,确定短路比约束下各新能源场站最大出力限值,外层模型以调相机配置容量最小为目标,计算各新能源场站实际出力与该场站最大出力限值的差值,对调相机配置容量进行校核。通过实际典型电网仿真分析表明,调相机优化配置后系统强度大幅提升,同时,98%的新能源场站最大可消纳空间达到各新能源场站理论最大可消纳空间的95%。

关键词:弱电网系统;短路比;新能源消纳;调相机;优化配置

中图分类号:TM761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202401014

0 引言

近年来,随着我国碳达峰碳中和目标的提出,光伏/风电新能源装机在传统电网中的占比不断提高,中国三北地区已发展为多个千万千瓦级新能源集群经特高压直流送出的大规模新能源基地。然而,高比例新能源集群场景下,由于缺乏传统同步机组的支撑,系统强度弱,新能源送出能力有限,弃风弃光严重。例如,冀北地区运行的四端柔直电网中,新能源主动支撑能力不足,造成汇集端2座换流站(康巴诺尔、中都换流站)仅满足新能源同时率50%的外送需求;张雄源网协调送端电网因短路比过低,送出极限仅为新能源接入规模的45%^[1]。由此可见,目前新能源的大规模开发缺乏与之匹配的高水平消纳能力,弱电网特征是制约新能源集群系统送出能力的关键因素。

随着大规模新能源接入电网,国内外专家学者提出了电网强度概念用以度量传统电网与所接入的新能源电力电子设备之间相互作用的强弱,并从频率支撑强度和电压支撑强度2个维度来表征^[2-3]。其中,电压支撑强度描述了系统发生较大扰动下维持电压稳定的能力,通常采用短路比指标来衡量^[4-6]。为了实现短路比指标对新能源并网系统强度的评估,有学者提出了临界短路比概念^[7-8]。通过比较系统实时短路比与临界短路比值的大小,评估系统电压支撑能力。针对不同新能源并网规模与新能源接

入形式有多种短路比指标构建方法^[9],故临界短路比指标计算与系统强弱判断边界值存在不统一的问题^[10-12]。对于新能源多馈入系统而言,文献[12]所提短路比和临界短路比计算方法可实现系统中各新能源场站短路比的计算,可评判新能源集群系统中的薄弱环节,有助于弱电网系统强度提升策略的制定,故本文主要参考该文献所提方法进行系统电网强度的评估。

目前,就新能源集群送端弱电网系统而言,其电网强度的提升通常由配置静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止无功发生器(static var generator, SVG)和调相机等无功补偿装置来实现,其中调相机因其优良的旋转机械属性、过载能力强的特点得到了广泛应用^[13-14]。目前,针对调相机的研究,主要集中于系统中暂态过电压抑制^[15-16]、换相失败抑制两方面^[17-18]。暂态过电压抑制方面,文献[15]从经济性角度,考虑直流闭锁暂态过电压约束,提出了送端电网换流站电容器和调相机的协调无功规划,但没有考虑分布式调相机的影响。进一步地,文献[16]考虑分布式调相机及其分层分散配置的作用,提出了调相机集中和分散接入不同电压等级配置方案。换相失败抑制方面,文献[17]指出配置调相机后可有效降低直流系统换相失败的概率;文献[18]针对多馈入直流系统,提出基于调相机抑制换相失败效果的调相机选址方案。综上,现有关于调相机配置选址问题主要通过建立系统暂态电压稳定性指标来确定;而调相机配置的定容问题则聚焦于通过构建数学优化问题进行求解,其数学模型通常以经济最优为目标,暂态过电压为约束。然而,现有关于调相机对提升系统电压支撑能力的应用研究鲜少考虑新能源消纳的目标,无法保证大规模新能源并网的高水平消纳,且没有分析弱电网特征下系统新能源集群送端系统新能源消纳受限量与表征电网

收稿日期:2023-04-06;修回日期:2023-08-21

在线出版日期:2024-01-29

基金项目:国网冀北电力有限公司科技项目(52010121N00L);四川省科技计划资助项目(2023YFSY0032)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd.(52010121N00L) and the Science and Technology Program of Sichuan Province (2023YFSY0032)

强度的短路比指标之间的关联,故可通过分析电网强度与新能源消纳之间的耦合机理,建立促进新能源集群送出的调相机优化配置模型,提升新能源集群送端电网的外送能力。

本文从促进弱电网新能源集群外送角度出发,量化分析了调相机接入对新能源集群外送消纳能力的提升效果。基于临界短路比建立了短路比指标与新能源集群外送能力之间的耦合关系,由短路比约束逆推出满足电网强度目标下各新能源场站的最大有功出力;从理论上论证了调相机接入可提高系统短路比,从而提高系统强度,进而提高各新能源场站的最大有功出力,促进新能源集群外送消纳。在此基础上,建立了兼顾弱电网系统强度和新能源集群消纳的调相机配置双层优化模型。通过三北地区某实际新能源集群外送系统的仿真分析表明,调相机优化配置后 98% 的新能源场站最大可消纳空间达到各新能源场站理论最大可消纳空间的 95%。

1 弱电网新能源集群送出能力评估

1.1 新能源集群的短路比分析方法

在新能源渗透率较高的电力系统中,系统强度是一个普遍关注的问题,系统“强”和“弱”是一个相对的概念,不是单纯根据接入交流电网的新能源设备容量大小进行评估,即不能简单判断为新能源并网容量小的系统电网强度就高于新能源并网容量大的电力系统。目前,常用短路比 ξ_{SCR} 来描述新能源集群系统强度^[12],表达式如下:

$$\xi_{SCR} = \frac{S_{ac}}{P_N} = \frac{U_N^2}{P_N |Z|} = \frac{1}{|Z_{pu}|} \quad (1)$$

式中: S_{ac} 为交流系统短路容量; P_N 为新能源设备额定容量; U_N 为并网母线额定电压; Z 为系统阻抗; Z_{pu} 为系统阻抗标么值。

针对新能源多馈入系统,上述传统短路比指标存在 2 点不足:一是各并网点的新能源装机容量不同,难以统一基准容量;二是并网点电压的影响不仅与该并网点直接相连的新能源有关,还要考虑其他馈入新能源的影响。故采用交流系统短路容量与新能源等效并网容量的比值,提出基于容量计算的短路比指标 ξ_{SCR-S} ^[12]。系统节点 i 处的短路比指标 ξ_{SCR-S_i} 为:

$$\xi_{SCR-S_i} = \frac{S_{ac,i}}{S_{eq,i}} = \frac{S_{ac,i}}{\left| S_i + \sum_{j \neq i} \frac{Z_{ji}^*}{Z_{ii}^*} \frac{U_i}{U_j} S_j \right|} \quad (2)$$

式中: $S_{eq,i}$ 为系统节点 i 处新能源等效并网容量; $S_{ac,i}$ 为系统节点 i 处的短路容量; S_i 、 S_j 分别为系统节点 i 、 j 处的新能源装机容量; U_i 、 U_j 分别为系统节点 i 、 j 的电压; Z_{ii}^* 、 Z_{ji}^* 分别为系统自阻抗、互阻抗的共轭。

1.2 基于短路比指标的新能源集群送出能力评估

为了分析短路比指标与新能源集群系统送出能力之间的关联,本节将式(2)所示的短路比计算公式简化表示为:

$$\xi_{SCR-P_i} = \frac{S_{ac,i}}{\left| P_i + \sum_{j \neq i} r_{ji} P_j \right|} \quad (3)$$

$$r_{ji} = \frac{Z_{ji}}{Z_{ii}} \quad (4)$$

式中: P_i 、 P_j 分别为系统节点 i 、 j 的新能源有功出力值; r_{ji} 为系统节点 j 、 i 之间的电压交互影响因子; Z_{ii} 、 Z_{ji} 分别为系统自阻抗和互阻抗。

需要指出的是,本文主要关注运行阶段短路比对系统强度的评估,故利用并网点新能源实际出力来计算系统电源节点等效短路比,而不是新能源装机容量。由式(3)可知,当交流系统结构一定时,并网点新能源出力越大,系统等效短路比越低,系统强度越弱。

当采用短路比指标评估新能源并网系统强弱时,需要建立短路比指标与系统静态电压稳定之间的联系。目前,通常采用临界短路比 ξ_{CSCR} 来表征此关联,即当新能源并网点短路比值小于 ξ_{CSCR} 时,该并网点系统强度弱。由此可以得到式(5)所示的电网强度约束。

$$\frac{S_{ac,i}}{\left| P_i + \sum_{j \neq i} r_{ji} P_j \right|} \geq \xi_{CSCR} \quad (5)$$

对式(5)做进一步推导,得到满足电网强度约束下,并网点新能源有功出力最大值,具体表达式如下:

$$\left| P_i + \sum_{j \neq i} r_{ji} P_j \right| \leq \frac{S_{ac,i}}{\xi_{CSCR}} \quad (6)$$

文献[12]指出,对于新能源多馈入系统而言,将临界短路比极值 2 作为划分新能源并网系统强弱的标准,即当 $\xi_{CSCR}=2$ 时,由式(6)计算所得到的并网点新能源出力即为该并网点在电网强度约束下的新能源出力最大值 P_i^{newmax} 。由此可知,新能源并网系统强度越弱,计算所得到的并网点新能源出力最大值 P_i^{newmax} 越小,弱系统制约了新能源集群送出能力。反之,当所得到的各并网点新能源出力最大值 P_i^{newmax} 达到并网点新能源装机容量时,即可以认为此时系统强度足以支撑新能源的接入,新能源集群系统的送出能力强。图 1 描述了新能源集群系统强度与新能源外送能力之间的关联,图中新能源实际最大可消纳空间为“①+②+③”,当考虑式(6)所示的短路比约束时,计算所得场站新能源出力最大值为 $P_{newmax,1}$,新能源最大外送量为面积①,远低于新能源实际最

大可消纳空间“①+②+③”,弱电网特征导致新能源送出能力严重受阻;当给系统配置一定容量的无功补偿设备后,系统强度得以提升,故此时计算所得场站新能源出力最大值 $P_{\text{newmax},2} > P_{\text{newmax},1}$,使得弱电网系统的最大可消纳空间增大为“①+②”,当给系统配置足够容量的无功设备使新能源场站短路比值高于2时,此时场站新能源最大出力值达到场站新能源的装机容量,意味着此时系统强度足以支撑新能源的大规模外送需求,故可以通过配置无功补偿设备的方式提高新能源集群系统强度,从而提高新能源集群系统的新能源外送能力。

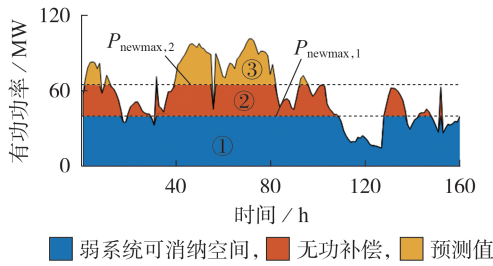


图1 系统强度与新能源消纳关联分析示意图

Fig.1 Schematic diagram of system strength and new energy consumption correlation analysis

综上,可通过短路比约束下计算所得各新能源并网点有功出力最大值 P_i^{newmax} 与对应并网点新能源装机容量的相对大小,对新能源集群系统送出能力进行评估;即当 P_i^{newmax} 远小于对应新能源场站装机容量时,新能源集群系统送出能力弱;反之,当 P_i^{newmax} 达到对应新能源场站装机容量时,新能源集群系统送出能力强。

2 调相机对系统短路比影响分析

为提升新能源集群系统送出能力,需要提升新能源集群弱电网系统强度。目前,常见的无功补偿方式包括安装SVC、SVG、调相机以及利用新能源设备自身所发出的无功进行无功补偿等。其中,调相机对于系统强度的提升效果最明显^[5]。下面通过分析调相机接入后对式(3)中短路比计算的影响,以实现提升新能源集群系统送出能力的调相机的优化配置。

式(3)中短路容量计算如下:

$$S_{\text{ac},i} = \sqrt{3} V_{\text{av},i} I_{\text{ac},i} \quad (7)$$

式中: $V_{\text{av},i}$ 为系统节点 i 处的平均额定电压; $I_{\text{ac},i}$ 为系统节点 i 处的三相短路电流。以标幺值形式表示,式(7)可变为:

$$S_{\text{ac},i}^{\text{pu}} = \frac{\sqrt{3} V_{\text{av},i} I_{\text{ac},i}}{\sqrt{3} V_B I_B} = \frac{I_{\text{ac},i}}{I_B} = I_{\text{ac},i}^{\text{pu}} = \frac{1}{Z_{ii}^{\text{pu}}} \quad (8)$$

式中: V_B 、 I_B 分别为系统的基准电压和基准电流; $S_{\text{ac},i}^{\text{pu}}$ 、 $I_{\text{ac},i}^{\text{pu}}$ 分别为系统节点 i 处短路容量和短路电流的

标幺值; Z_{ii}^{pu} 为系统节点 i 处自阻抗的标幺值,该值由系统导纳矩阵获得,推导过程见式(9)~(11)。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Y}^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: \mathbf{Y} 、 \mathbf{Z} 分别为系统节点导纳和阻抗矩阵;对角元素 Y_{ii} ($i=1,2,\dots,n$, n 为节点总数)即为系统节点 i 处的自导纳,该值为系统节点 i 处所有支路导纳之和,非对角元素 Y_{ij} 为系统节点 i 、 j 间的互导纳,其值为系统节点 i 、 j 间支路导纳的负值;对角元素 Z_{ii} 为系统节点 i 处的自阻抗,非对角元素 Z_{ij} 为系统节点 i 、 j 间的互阻抗。

调相机的本质是同步旋转电机,为了便于分析调相机接入后对系统短路比的影响,将其等值为电流源和并联阻抗,如图2所示,图中 X_{sc} 为调相机电抗参数的标幺值。由图2可知,调相机接入节点 i 后,节点 i 处的自导纳为:

$$Y_{ii,\text{new}} = Y_{ii,\text{old}} + \frac{1}{jX_{\text{sc}}} \quad (12)$$

式中: $Y_{ii,\text{old}}$ 、 $Y_{ii,\text{new}}$ 分别为调相机接入前、后节点 i 处的自导纳。

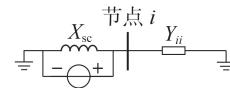


图2 调相机接入系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of synchronous condenser access to system

同时,调相机接入系统后,对系统阻抗矩阵的影响为^[19]:

$$\mathbf{Z}^{\text{new}} = \mathbf{Z} - \frac{\mathbf{Z}_i^T \mathbf{Z}_i}{Z_{ii} + z_{\text{sc}}} \quad (13)$$

式中: z_{sc} 为调相机接入系统后等效的对地并联支路阻抗; $\mathbf{Z}_i = [Z_{i1}, \dots, Z_{ii}, \dots, Z_{in}]$ 为阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的第 i 行向量。将矩阵展开后,系统受调相机接入影响后的元素可表达为:

$$Z_{pq}^{\text{new}} = Z_{pq} - \frac{Z_{ip} Z_{iq}}{Z_{ii} + z_{\text{sc}}} \quad p=1,2,\dots,n; q=1,2,\dots,n \quad (14)$$

结合式(12)和式(14)可知,调相机接入节点 i 后,节点阻抗矩阵所有元素都会减小,且会使导纳矩阵中的对角线值发生变化,故系统自阻抗 Z_{ii} 减少最多。故调相机通过提升系统短路容量,进而提高系统短路比。

此外,调相机作为无功源,应将其作为电源点参与等效短路比的计算,其无功出力为 Q_{sc} ,由式(2)可知,调相机无功出力也会对系统短路比计算产生影响。

3 调相机优化配置模型与求解

由上述分析可知,不同调相机的安装位置与容量对系统电网强度提升效果不同。因此,可以建立以新能源最大化消纳和调相机配置总容量最小为目标的调相机优化配置模型。本文采用双层优化模型:在内层模型中,以各新能源场站出力最大为目标,确定短路比约束下各新能源场站最大出力限值;在此基础上,外层模型以调相机配置容量最小为目标,计算各新能源场站实际出力与该场站最大出力限值的差值,对调相机配置容量进行校核。在计算过程中,内、外层模型相互制约,通过反复迭代最终得到最优解。

3.1 外层模型

在外层模型中,以调相机配置容量最小为目标,并以各新能源场站由短路比约束而导致的新能源弃电率小于5%为约束,本层的优化变量为调相机安装额定容量与安装位置。具体表达式为:

$$\min F^{\text{ex}} = \sum_{i=1}^M u_i^{\text{SC}} S_i^{\text{SC}} + \sum_{i=1}^{N_c} u_i^{\text{C}} S_i^{\text{C}} + \sum_{j=1}^{N_D} u_j^{\text{D}} S_j^{\text{D}} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^T \max(P_{i,t}^{\text{new}} - P_i^{\text{newmax}}, 0) \leq 5\% \sum_{i=1}^T P_{i,t}^{\text{new}} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (16)$$

式中: F^{ex} 为外层模型目标函数; u_i^{SC} 、 S_i^{SC} 分别为调相机安装位置变量与调相机安装容量,其包含了集中式调相机与分布式调相机; M 为调相机安装的节点位置总数; S^{C} 为高压直流侧换流站交流母线上集中配置的大型调相机容量; S^{D} 为新能源汇集站交流母线上分散配置的小型调相机容量; u_i^{C} 、 u_j^{D} 分别为集中式、分布式调相机的安装位置变量; N_c 、 N_D 分别为系统高压直流侧换流站数和新能源35 kV汇集场站数; $P_{i,t}^{\text{new}}$ 为各新能源场站在 t 时刻的有功出力; N 为新能源场站数; T 为新能源出力总时刻数。

为了方便模型求解,本文将外层模型的约束优化问题转化为无约束优化问题,即将式(16)的不等式约束转化为惩罚项加入外层模型的目标函数中,构造如式(17)所示的辅助函数。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F_{\Delta P}^{\text{ex}} = \sum_{i=1}^{N_c} u_i^{\text{C}} S_i^{\text{C}} + \sum_{j=1}^{N_D} u_j^{\text{D}} S_j^{\text{D}} + \sum_{n=1}^N \Delta P_n \\ \Delta P_n = \begin{cases} 10^8 \sum_{t=1}^T \max(P_{n,t}^{\text{new}} - P_n^{\text{newmax}}, 0) > 5\% \sum_{t=1}^T P_{n,t}^{\text{new}} \\ 0 \sum_{t=1}^T \max(P_{n,t}^{\text{new}} - P_n^{\text{newmax}}, 0) \leq 5\% \sum_{t=1}^T P_{n,t}^{\text{new}} \end{cases} \end{array} \right. \quad (17)$$

式中: $F_{\Delta P}^{\text{ex}}$ 为罚函数; ΔP_n 为惩罚项。

3.2 内层模型

内层模型中,为了提高新能源集群系统的新能源送出能力,以各新能源场站出力最大为目标,确定短路比约束下各新能源场站出力最大值,并将该值输入外层模型中;在外层模型给定调相机安装位置和容量的基础上,内层模型通过短路比约束,对外层模型的调相机安装位置与容量进行迭代修正,从而得到最优的调相机安装位置与容量。具体表达式为:

$$\max F^{\text{in}} = \sum_{i=1}^N P_i^{\text{newmax}} \quad (18)$$

$$\frac{S_i^k}{\left| S_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N S_j r_{ji} \right|} \geq 2 \quad (19)$$

$$S_i^k = \frac{1}{Z_{ii}^{\text{new}}} = \frac{1}{f(u_i^{\text{sc}}, z_i^{\text{sc}}, Z_{ii}^{\text{old}})} \quad (20)$$

$$r_{ji} = \frac{Z_{ji}^{\text{new}}}{Z_{ii}^{\text{new}}} \quad (21)$$

$$0 \leq P_i^{\text{newmax}} \leq P_i^{\text{M}} \quad (22)$$

$$S_i \in [j0.8u_1^{\text{C}} S^{\text{C}}, \dots, j0.8u_{N_c}^{\text{C}} S^{\text{C}}] \cup$$

$$[j0.8u_1^{\text{D}} S^{\text{D}}, \dots, j0.8u_{N_D}^{\text{D}} S^{\text{D}}] \cup$$

$$[P_1^{\text{newmax}}, \dots, P_N^{\text{newmax}}] \quad (23)$$

$$S_j \in [j0.8u_1^{\text{C}} S^{\text{C}}, \dots, j0.8u_{N_c}^{\text{C}} S^{\text{C}}] \cup$$

$$[j0.8u_1^{\text{D}} S^{\text{D}}, \dots, j0.8u_{N_D}^{\text{D}} S^{\text{D}}] \cup$$

$$[P_1^{\text{newmax}}, \dots, P_N^{\text{newmax}}] \quad (24)$$

式中: Z_{ii}^{old} 为系统未配置调相机时的自阻抗; z_i^{sc} 为节点 i 处接入调相机的阻抗值; F^{in} 为内层模型目标函数;函数 f 为不同调相机配置下对系统阻抗矩阵的影响,即式(13)、(14)所示推导过程; P_i^{M} 为系统节点 i 处的新能源装机容量; Z_{ji}^{new} 、 Z_{ii}^{new} 分别为不同调相机配置下系统的互阻抗与自阻抗。

式(23)、(24)分别表示电源节点 i 、 j 的有功出力值或无功出力值。在本文模型中,新能源场站位于低压侧(0.4 kV或0.69 kV),调相机配置在35 kV母线处,故系统中电源节点出力值为新能源有功出力或者为调相机无功出力。

式(19)表示新能源集群系统短路比约束,由参考文献[12]可知,系统临界短路比取为2;由该短路比约束可知,当不配置调相机,即各新能源场站节点的短路容量一定时,各新能源场站有功出力值越大,该新能源场站的等效短路比越小,这也是新能源集群系统电网强度低的原因。当以临界短路比2为约束边界条件时,可以得到每座新能源场站在满足电网强度要求下的新能源出力最大值 P_i^{newmax} ,当未对新能源集群系统进行无功补偿时,该出力最大值 P_i^{newmax} 较小,远小于新能源场站光伏/风电装机容量,严重影响新能源的消纳送出。

内层模型通过输入外层模型的调相机安装位置与容量,对新能源集群系统进行调相机配置,从而提高新能源集群系统节点的短路容量,提高各新能源场站出力最大值 P_i^{newmax} ;而不同调相机的安装位置与安装容量对系统中各节点短路容量提升效果不同,内层模型重复计算不同外层模型的调相机安装位置与安装容量下的各新能源场站出力最大值 P_i^{newmax} ,得到多个目标值 F^{in} 和 F^{ex} ,比较不同调相机配置下的海量目标值,从而优选出接入总容量较少的调相机配置方案,以显著提升新能源接入后的系统电网强度,进而保证新能源集群送端系统的新能源送出能力,计算过程中内、外层相互制约,通过反复迭代最终得到最优解。

3.3 模型求解

3.3.1 外层模型求解

从工程实际角度考虑,小型分布式调相机容量通常为50 Mvar,大型集中式调相机容量通常为300 Mvar。故本文所提外层模型中,待求解的变量为系统各节点处所安装的调相机台数,为离散型变量,属于混合整数问题,可采用遗传算法进行求解。设置染色体结构为:

$$X = [\mu_1^c \cdots \mu_{N_c}^c | \mu_1^d \cdots \mu_{N_d}^d] \quad (25)$$

式中: μ_i^c 、 μ_i^d 分别为系统不同节点处所安装的集中式和分布式调相机台数,采用整数编码。

3.3.2 内层模型求解

在内层模型中,优化的变量包括各新能源场站的有功出力最大值 P_i^{newmax} 和外层模型所输入的系统不同节点处调相机安装台数。由于式(19)所表示的短路比约束是非线性的,故内层模型属于混合整数非线性优化问题;但在外层模型中,由于系统不同节点处调相机安装台数变量以遗传算法变量形式存在,使得不同调相机配置下系统新能源节点处的短路比计算过程是一个数值运算过程,不涉及决策变量的非线性运算,故内层模型可采用MATLAB的CPLEX求解器进行求解。

3.3.3 算法步骤

步骤1,输入系统网络参数,包括系统中的线路、变压器、并联电容器、同步发电机次暂态电抗、负荷恒阻抗,计算系统导纳矩阵 Y_{old} 。

步骤2,对外层模型变量进行遗传编码,生成外层模型的初始种群。

步骤3,针对外层模型初始种群的每个个体,计算当前种群下系统导纳矩阵 Y_{new} ,对导纳矩阵求逆得到系统阻抗矩阵,提取电源节点(新能源节点和调相机配置点)的自阻抗和互阻抗,计算各个电源点的短路容量,根据式(4)计算各个电源点之间的电压交互影响因子。

步骤4,针对外层模型初始种群的每个个体,进行内层模型的最优化求解,获得内层模型在短路比约束下的各个新能源场站的有功出力最大值。

步骤5,将内层模型最优目标下所求解的各新能源场站出力最大值 P_i^{newmax} 返回至外层模型,计算外层模型目标函数值。对外层种群进行遗传操作,包括选择、交叉、变异,获得新种群。

步骤6,判断是否达到最大迭代次数,若达到,则退出计算并输出结果;否则,令迭代次数 $k=k+1$,转至步骤2。

算法流程图见附录A图A1。

4 算例分析

4.1 系统描述

本节针对某实际新能源集群外送场景,构建新能源汇集送端仿真试验系统(系统结构如附录A图A2所示),开展促进新能源集群消纳外送的调相机优化配置研究。该新能源汇集区域拥有130座新能源场站,分别汇集于4座500 kV变电站,并通过1050 kV高压站经特高压交流送出,新能源总装机容量约为11000 MW,其中风电装机容量约为7500 MW,光伏装机容量约为3500 MW。

根据该地区某一时刻各新能源场站出力情况,计算得到图3所示的各新能源场站短路比结果。由图3所示对比结果可知:该仿真试验系统新能源电站的短路比主要集中分布在1.5以下,小于新能源集群系统的临界短路比值2^[12],属于低短路比系统;其中,短路比最小值小于1,系统强度极弱,该站点新能源送出受阻严重,故需要开展促进新能源集群消纳外送的调相机优化配置研究,提高各新能源场站的系统强度。

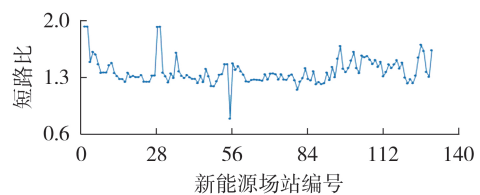


图3 各新能源场站短路比

Fig.3 Short circuit ratio of each new energy station

4.2 调相机优化配置结果分析

对于图A2所示的新能源集群送端系统,根据本文所提出的调相机配置方法,进行调相机“集中式+分布式”混合配置。其中,集中式调相机放置于500 kV变电站,分布式调相机放置于35 kV变电站。结果显示,需要配置1台300 Mvar的集中式调相机以及63台50 Mvar的分布式调相机,调相机配置总容量为3450 Mvar,调相机安装位置分布如图4所示。图中:集中式调相机编号为1—4,其余均为分布式调

相机(遗传算法迭代过程图如附录 A 图 A3 所示)。

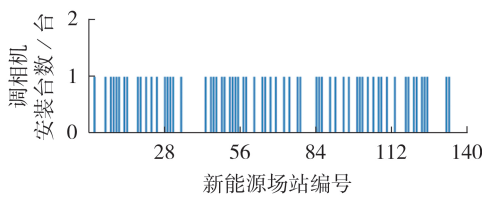


图 4 调相机安装位置分布

Fig.4 Distribution of installation position of synchronous condenser

在此调相机配置方案下,满足电网强度约束下的各新能源场站最大可消纳空间达到各新能源场站理论最大可消纳空间的 95% 的新能源场站数量高达 128 座,故所提调相机配置方法可有效兼顾系统电网强度和集群新能源大规模外送消纳的目标。调相机配置前、后,各新能源并网点短路比和各新能源并网点最大可消纳空间对比分别如图 5、6 所示。由于篇幅有限,只展示部分新能源场站在此调相机配置方案下对比结果,如表 1 所示。

根据表 1,通过无调相机配置和本文所提调相机配置结果下的各新能源并网点短路容量可知,调相机通过提高系统短路容量,进而提高了系统的短路比,所得结论与前述理论分析结果一致。通过无调相机配置和本文所提调相机配置结果下的各新能源并网点在短路比约束下的有功出力最大值 P^{newmax} 可知,在此调相机配置方案下,各新能源并网点的有功出力最大值 P^{newmax} 得到有效提升,大部分新能源

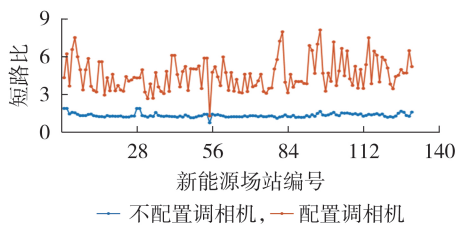


图 5 调相机配置前、后短路比

Fig.5 Short circuit ratio before and after configuration of synchronous condenser

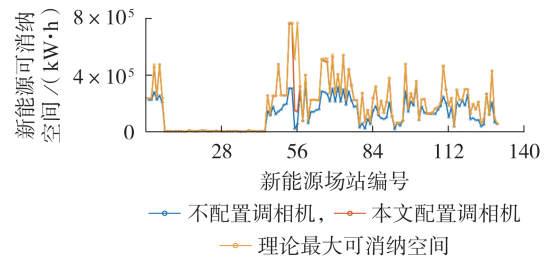


图 6 调相机配置前、后新能源可消纳空间

Fig.6 New energy accommodation space before and after configuration of synchronous condenser

场站的有功出力最大值 P^{newmax} 提升至各新能源场站的装机容量,意味着此调相机配置方案下系统强度得到了有效提升,足以支撑大规模新能源接入和高水平消纳。

5 结论

本文基于短路比指标对电网强度的量化评估作用,并结合临界短路比指标建立了新能源集群外送消纳能力与短路比指标的关联,分析了调相机接入对短路比指标的影响,提出了提升弱电网新能源集群送出能力的调相机优化配置方法。通过仿真算例分析,得出如下结论:

1)以临界短路比值 2 作为系统静态电压稳定的边界条件,建立了短路比指标与新能源集群外送能力之间的关联,由短路比约束逆推出各新能源并网点满足电网强度目标下的有功出力最大值 P^{newmax} ,通过比较各新能源并网点的有功出力最大值 P^{newmax} 与对应场站装机容量的相对大小,可量化评估弱电网特征对新能源消纳的约束量;

2)调相机可提高系统短路容量,从而提高系统短路比,进而提升短路比约束下的新能源场站的有功出力最大值 P^{newmax} ,量化了调相机对集群新能源外送消纳能力提升效果;

3)本文提出的调相机配置方法,可实现接入总容量较少的调相机,显著提升了系统电网强度和新能源最大可消纳空间,可兼顾经济性和工程实用性,

表 1 部分新能源场站调相机配置结果

Table 1 Synchronous condenser configuration results of some new energy stations

新能源场站编号	短路容量 / MW		短路比		装机容量 / MW	P^{newmax} / MW		短路比约束下最大可消纳空间 / (GW·h)		理论最大可消纳空间 / (GW·h)
	无调相机	有调相机	无调相机	有调相机		无调相机	有调相机	无调相机	有调相机	
1	221.99	224.10	1.93	4.37	49.5	45.08	49.50	225.40	236.25	236.25
2	439.27	455.55	1.48	3.69	100	41.03	89.76	2.81	2.88	2.89
3	1309.68	1661.47	1.31	3.75	300	91.70	300.00	8.44	8.66	8.66
4	388.22	408.48	1.32	3.23	100	32.13	73.01	2.82	2.86	2.89
5	362.73	788.46	1.29	6.14	75	19.20	75.00	2.10	2.17	2.17
6	528.08	963.09	1.34	5.30	100	36.29	100.00	190.66	257.52	257.52
7	467.76	693.15	1.25	4.78	100.5	21.25	100.50	140.32	224.72	224.72
8	869.46	941.27	1.35	3.65	150	56.35	145.54	318.64	407.11	407.18

但经济性方面,尚未考虑调相机后期的运行维护成本,需要在后续研究中开展进一步工作。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张玮,白恺,鲁宗相,等. 特大型新能源基地面临挑战及未来形态演化分析[J]. 全球能源互联网,2023,6(1):10-25.
ZHANG Wei, BAI Kai, LU Zongxiang, et al. Analysis of the challenges and future morphological evolution of super large-scale renewable energy base[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 10-25.
- [2] Australian Energy Market Operator. System strength in the NEM explained[R]. Sydney, Australian: AEMO Information & Support Hub, 2020.
- [3] Australian Energy Market Operator. Renewable integration study: stage 1 report[R]. Sydney, Australian: AEMO Information & Support Hub, 2020.
- [4] 吴林林,李蕴红,于思奇,等. 基于短路比指标的风电汇集系统稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2022,42(8):72-78.
WU Linlin, LI Yunhong, YU Siqi, et al. Stability analysis of dense wind power area based on short circuit ratio index[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 72-78.
- [5] 辛焕海,甘德强,鞠平. 多馈入电力系统广义短路比:多样化新能源场景[J]. 中国电机工程学报,2020,40(17):5516-5526.
XIN Huanhai, GAN Deqiang, JU Ping. Generalized short circuit ratio of power systems with multiple power electronic devices: analysis for various renewable power generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5516-5526.
- [6] 朱焱志,曲立楠,刘纯,等. 新能源发电集群的改进等效短路比计算方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(22):74-82.
ZHU Lingzhi, QU Linan, LIU Chun, et al. Improved calculation method of equivalent short-circuit ratio for power generation cluster of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 74-82.
- [7] 王烨,郭春义,赵成勇. 基于小干扰稳定性和运行约束条件的MMC系统临界运行短路比评估方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(10):2853-2863.
WANG Ye, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong. A quantitative evaluation approach for critical operating SCR of MMC system based on small-signal stability and operating constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2853-2863.
- [8] 曹炜,钦焕乘,陆建忠,等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(4):190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [9] 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. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499-515.
- [10] 杨松浩,李秉芳,赵天骥,等. 新能源场站分布式同步调相机暂态功角失稳形态及机理[J]. 电力系统自动化,2023,47(3):12-18.
YANG Songhao, LI Bingfang, ZHAO Tianqi, et al. Transient angle instability mode and mechanism of distributed synchronous condensers in renewable energy station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 12-18.
- [11] WU Di, LI Gangan, JAVADI M, et al. Assessing impact of renewable energy integration on system strength using site-dependent short circuit ratio[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1072-1080.
- [12] 于琳,孙华东,赵兵,等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(3):919-929.
YU Lin, SUN Huadong, ZHAO Bing, et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 919-929.
- [13] 李志强,王东阳,肖洋. 用于调相机-飞轮储能系统的磁齿轮调速器设计[J]. 电力自动化设备,2023,43(7):66-72.
LI Zhiqiang, WANG Dongyang, XIAO Yang. Design of magnetic-gear speed regulator in energy storage system with synchronous condenser and flywheel[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 66-72.
- [14] 曹炜,张甜,傅业盛,等. 同步调相机增强电力系统惯性和改善频率响应的研究与应用[J]. 电力系统自动化,2020,44(3):1-10.
CAO Wei, ZHANG Tian, FU Yesheng, et al. Research and application for increasing inertia and improving frequency response of power system by using synchronous condenser[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 1-10.
- [15] 赵溶溶,柯德平,孙元章,等. 考虑直流闭锁暂态过电压约束的送端电网换流站高效无功规划[J]. 南方电网技术,2022,16(7):10-21.
ZHAO Rongrong, KE Deping, SUN Yuanzhang, et al. Efficient reactive power planning of converter station in HVDC sending system considering HVDC blocking transient overvoltage constraint[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(7): 10-21.
- [16] 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 synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 124-129.
- [17] 王雅婷,张一驰,周勤勇,等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术,2017,41(1):22-28.
WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [18] 王强,李天然,唐小波,等. 应对多馈入直流换相失败的不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. Method of site selection for synchronous condenser responding to commutation failures of multi-infeed DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 222-227.
- [19] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003:36-43.

作者简介:

王泽森(1989—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为电力电量平衡、电力系统稳定分析等(E-mail: wangzesen_008@163.com);

李海波(1990—),男,副研究员,博士,主要研究方向为可再生能源并网规划与运行、电力系统灵活性、综合能源系统等(E-mail: lihaibo@tsinghua-eiri.org);

秦建茹(1995—),女,助理工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为可再生能源并网、电力系统灵活性等(E-mail: qinjir_LK@126.com)。

(编辑 王欣竹)

(下转第44页 continued on page 44)

Capacity optimization allocation strategy of electric energy regulator with energy storage for power shock suppression in shore power system

LIU Qianyi, LI Yuan, LIU Fang, LI Shanglong

(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Aiming at the power quality problems such as impact power on the load side of port shore power system, a capacity optimization method of electric power regulator with energy storage is proposed. The topological structures of port shore power system and electric energy regulator with energy storage are introduced, and the operation characteristic of impact load is discussed. The relationship between load operation condition and power factor control objective is analyzed. According to the state of charge of battery and load operation condition, a compensation control strategy for adaptive capacity design of electric power regulator with energy storage under multiple operation conditions is proposed. A technical-economic model of electric energy regulator with energy storage is established, a capacity model is built by considering the power quality requirements of shore power system in the technical model, and the economic model provides a method to evaluate the life cost and benefit. Based on the measured data of port shore load, the effectiveness of the proposed method is verified.

Key words: shore power system; impact power; power quality; electric energy regulator with energy storage; capacity optimization

(上接第36页 continued from page 36)

Optimal configuration method of synchronous condenser to improve delivery capacity of new energy cluster in weak grid

WANG Zesen¹, LIU Miao¹, LI Haibo², QIN Jianru², GUO Jinzhi¹, BAI Kai¹

(1. State Grid Jibe Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China;

2. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610213, China)

Abstract: In view of the technical requirements for improving the strength of the weak grid at sending end and the new energy accommodation capacity, the relationship between the short circuit ratio index and the delivery capacity of the new energy cluster is analyzed. The influence of synchronous condenser access on short circuit ratio index is analyzed. A bi-level optimal model of synchronous condenser configuration considering the strength of weak grid system and the consumption of new energy cluster is established. The inner layer model takes the maximum output of each new energy station as the goal, determining the maximum output limit of each new energy station under the constraint of short circuit ratio. The outer layer model takes the minimum configuration capacity of synchronous condenser as the goal, calculating the difference between the actual output and the maximum output limit of each new energy station, and checking the configuration capacity of synchronous condenser. The simulation analysis of the actual typical power grid shows that the system strength is greatly improved after the optimal configuration of synchronous condenser. At the same time, the maximum accommodation space of 98% new energy stations can reach 95% of the theoretical maximum accommodation space of each new energy station.

Key words: weak grid system; short circuit ratio; new energy accommodation; synchronous condenser; optimal configuration

附录 A

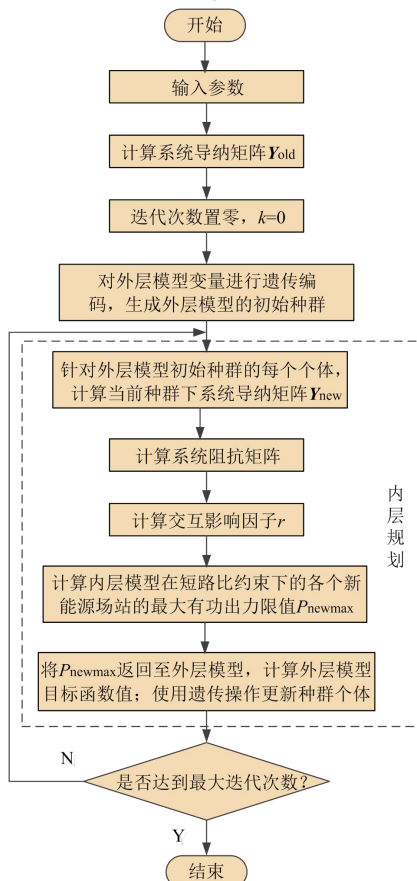


图 A1 算法流程

Fig.A1 Flowchart of algorithm

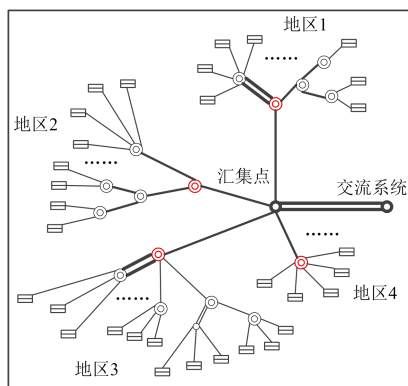


图 A2 工程算例示意图

Fig.A2 Schematic diagram of engineering calculation case

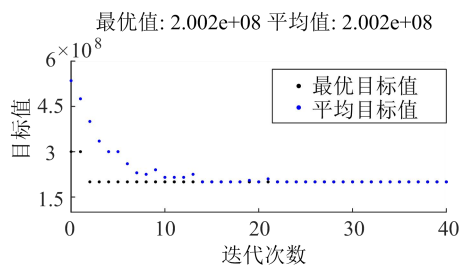


图 A3 遗传算法迭代过程

Fig.A3 Iteration process of genetic algorithm