第 52 卷 第 5 期：2213-2224 高电压技术 Vol.52, No.5: 2213-2224
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250379

新能源基地经柔性直流送出系统的构网型变流器优化配置方法

陈仕原[1,2]，林舜江[1,2]，杨悦荣[1,2]，江凯芸[1,2]，刘明波[1,2]
（1. 华南理工大学电力学院，广州 510640；2. 广东省绿色能源技术重点实验室，广州 510630）

摘　要：在新能源基地中配置适当比例的构网型变流器可以有效提升新能源基地经柔性直流送出系统的小扰动稳定性和送出能力。因此该文建立了一个新能源基地经柔性直流送出系统的构网型变流器优化配置模型，模型以最小化构网型变流器的配置成本为目标，约束条件包括送出系统的小扰动稳定性约束和送出能力约束。为了避免计算整个系统的小扰动全状态方程，模型中采用广义运行短路比约束替代小扰动稳定约束。针对广义运行短路比约束中包含矩阵特征值计算使得优化模型难以直接求解的问题，引入非负矩阵 Perron 根的边界值估计方法，将矩阵特征值约束转化为多个代数不等式约束，从而获得可以直接求解的混合整数非线性规划模型。最后，通过对中国西南地区某个新能源基地经柔性直流送出系统算例的分析，验证所提方法的正确性和有效性。
关键词：新能源基地；柔性直流输电系统；小扰动稳定性；送出能力；广义短路比；非负矩阵 Perron 根

Optimal Configuration Method of Grid Forming Convertors for Large-scale Renewable Generation Base Transmitted by VSC-HVDC System

CHEN Shiyuan[1,2], LIN Shunjiang[1,2], YANG Yuerong[1,2], JIANG Kaiyun[1,2], LIU Mingbo[1,2]
(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou 510630, China)

Abstract: Configuring an appropriate proportion of grid-forming (GFM) converters in the renewable generation base can effectively enhance the small signal stability (SSS) and transfer capacity (TC) of the renewable generation base which is transmitted by VSC-HVDC system (RGBTVS) system. In this paper, an optimal configuration model for GFM converters in RGBTVS is established, and the objective is minimizing the configuration costs while satisfying the constraints of required SSS and TC. To avoid full state-space SSS equation calculations for the entire system, the model employs a generalized operational short-circuit ratio (gOSCR) constraint instead of the SSS constraint. Addressing the challenge of eigenvalue calculation in the gOSCR constraints, an estimation method for the boundary values of Perron root of non-negative matrices is introduced to transform the matrix eigenvalue constraint into algebraic inequalities, resulting in a tractable mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model. Finally, case study on a practical RGBTVS in Southwest China validates the correctness and effectiveness of the proposed method.
Key words: renewable generation base; VSC-HVDC system; small signal stability; transfer capability; generalized short-circuit ratio; Perron root of non-negative matrix

0　引言

构建以新能源为主体的新型电力系统已成为中国电力行业发展的必然趋势[1-2]，为了进一步加大新能源发电占比，在沙漠、戈壁、荒漠等远离负荷中心的偏远地区建设大规模新能源发电基地，并通过远距离大规模高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)将电力集中输送到负荷中心地区已成为新能源开发的重要模式[3-4]。

柔性直流输电(voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC)具有可向交流系统提供动态无功支撑和独立调节有功和无功功率等优点，是实现大规模新能源基地电力集中送出的重要技术手段[5-6]。

基金资助项目：国家自然科学基金(51977080)；广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515240075)；广东省重点领域研发计划(2021B0101230004)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51977080), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2023A1515240075), Key Research and Development Project of Guangdong Province (2021B0101230004).

然而，新能源基地存在交流汇集网架结构薄弱和电压支撑能力不足等问题，使得如何将新能源功率安全送出面临着诸多挑战[7]。此外，新能源并网逆变器通常采用通过锁相环与电网同步的跟网型(grid-following, GFL)控制，而 GFL 变流器可能导致锁相环主导的小扰动稳定性问题，特别是在新能源基地经柔性直流送出系统这类低短路比(short-circuit ratio, SCR)的电力系统中[8]。因此，新能源基地经柔性直流送出系统的送出能力和小扰动稳定性是需要密切关注的问题。

不同于 GFL 变流器，构网型(grid-forming, GFM)变流器无需锁相环且具备自主构建电压的能力，其无功输出能力有利于缓解新能源基地缺乏电压支撑的问题，从而提高系统的送出能力；此外，外特性表现为电压源的 GFM 变流器有助于改善由锁相环主导的小扰动稳定问题[9]，因此，需要在新能源基地中配置适当比例的 GFM 变流器。

国内外已有学者对 GFM 变流器的优化配置方法开展了研究。文献[10]通过等效 SCR 分析风机设备及控制参数变化对风电场稳定性的影响，从而合理配置场内构网型风机的比例；文献[11]提出了基于运行 SCR 的新能源场站中 GFL/GFM 可切换单元最优配置方法。然而，文献[10-11]研究的都是单个新能源场站中的 GFM 变流器配置比例，没有考虑不同场站之间的相互影响。针对考虑场站之间相互影响的 GFM 变流器配置问题，文献[12]基于阻抗稳定性分析提出了满足全运行域振荡稳定约束的 GFM 变流器配置方法。文献[13-15]基于广义短路比(generalized SCR，gSCR)理论对 GFM 变流器的配置问题进行了研究，其中，文献[13]分析了 GFM 变流器配置比例对系统强度和稳定裕度的影响规律，并估算了实际工程中容量配比的典型值；文献[14]从提升系统小扰动稳定裕度的角度提出了 GFM 变流器的选址定容优化方法；文献[15]推导出跟网/构网型支撑能力量化指标与系统小扰动稳定性之间的关系，提出新能源场站混合变流器的协调优化配置方法。然而，文献[12-15]在配置 GFM 变流器时都只考虑了小扰动稳定性，没有考虑系统的新能源送出能力，并且文献[12,14-15]都是基于迭代的思想，每次选择安装单个 GFM 变流器或将单个 GFL 变流器改造为 GFM 变流器，此类迭代算法在应用于含大量新能源设备的大规模新能源基地时会存在迭代次数多和计算时间长等问题。此外，文献[14-15]采用迭代算法的原因是 gSCR 约束中含有矩阵特征值计算，难以构造出可直接求解的优化问题。

鉴于此，本文提出一种新能源基地经柔直送出系统的 GFM 变流器优化配置方法。模型中考虑系统的送出能力和小扰动稳定性，并采用广义运行短路比(generalized operational SCR，gOSCR)约束替代小扰动稳定约束，引入非负矩阵 Perron 根的边界值估计方法，将广义运行短路比约束中的矩阵特征值约束转化为多个代数不等式约束，从而获得可直接求解的混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming, MINLP)模型。最后，通过中国西南地区某个新能源基地经柔直送出系统算例对所提出方法进行验证与分析。

1 问题描述

本文的研究对象为如图 1 所示的新能源基地经柔直送出系统。新能源基地中含有多个光伏电站和风电场，二者的变流器都可以按照控制方式分为 GFL 或 GFM 控制，由于新能源场站对电网的影响主要由其并网变流器决定，因此文中不对光伏和风电进行区分，只考虑 GFL 变流器和 GFM 变流器的区别。基地中多个光伏电站和风电场的功率通过交流汇集网络汇集到送端柔直换流站集中送出。送端柔直换流站工作在整流状态以实现新能源功率外送，且通常采用 *U*/*f* 控制方式[16-17]。

新能源基地经柔直送出系统是一种没有同步发电机支撑的发输电系统。目前大多数新能源变流器均采用 GFL 控制，且通常工作在功率因数接近 1 的状态，因此新能源基地通常面临着缺乏无功功率支撑的问题，而无功功率支持不足会降低系统的送

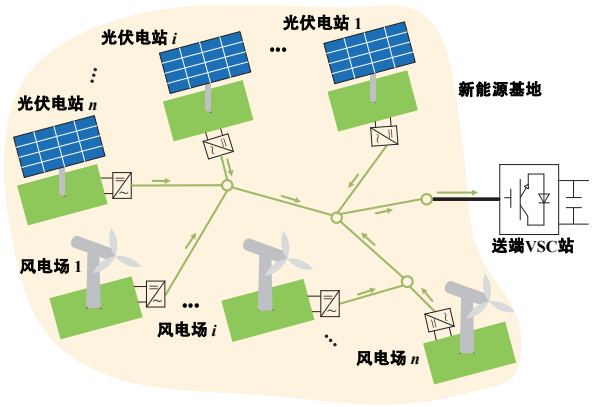


图 1 新能源基地经柔直送出系统的结构图

Fig.1 Structure of a renewable generation base transmitted by VSC-HVDC system

出能力。此外，GFL 变流器呈现出弱支撑能力特性，其仅在接入强电网时能表现出良好的小扰动稳定性，而新能源基地缺乏同步机支持，是一个弱电网，因此新能源基地往往面临着 GFL 变流器锁相环主导的小扰动稳定问题[13-15]。GFM 变流器能够通过 Q-U 下垂控制环节提供一定的无功功率，且在弱电网条件下也能保持良好的稳定性，还能抑制 GFL 变流器锁相环主导的小扰动稳定性[14-15]。因此，有必要在新能源基地中配置适当比例的 GFM 变流器来提高送出系统的送出能力和小扰动稳定性。

然而，GFL 变流器具有控制功率响应快的特点，能够满足最大功率点跟踪要求，经济性较好；而 GFM 变流器控制功率响应慢，经济性较差[18-19]。因此，尽管在新能源基地中配置 GFM 变流器能够提高系统的送出能力和小扰动稳定性，但大量配置会影响系统运行的经济性。因此，如何优化配置 GFM 变流器，以满足系统运行所需的送出能力和小扰动稳定性，是亟需解决的关键问题。

2 构网型变流器优化配置的相关理论

2.1 构网型变流器的电压无功控制特性

GFM 变流器的 Q-U 下垂控制环节可以给交流集电网络提供一定的电压支撑，充分发挥变流器的无功输出能力。考虑实际工程中常用的 Q-U 下垂控制策略，则 GFM 变流器的电压无功关系可描述为[20]：

$$Q_{\mathrm{M}i}=\left(U_{\mathrm{Mref}i}-U_i\right)/n_{\mathrm{q}i}+Q_{\mathrm{Mref}i} \tag{1}$$

式中：$Q_{\mathrm{M}i}$ 和 U_i 分别为 GFM 变流器 i 的输出无功和并网点电压；$Q_{\mathrm{Mref}i}$ 和 $U_{\mathrm{Mref}i}$ 分别为 $Q_{\mathrm{M}i}$ 和 U_i 的参考值；$n_{\mathrm{q}i}$ 为下垂控制系数，计算如式(2)。

$$n_{\mathrm{q}i}=(U_{\mathrm{Mref}i}-U_{\mathrm{M}i\min})/(Q_{\mathrm{M}i\max}-Q_{\mathrm{Mref}i}) \tag{2}$$

式中：$U_{\mathrm{M}i\min}$ 为 U_i 的下限；$Q_{\mathrm{M}i\max}$ 为的 $Q_{\mathrm{M}i}$ 上限。

GFM 变流器只能在其无功容量范围内维持下垂控制，其输出无功达到上限时，下垂控制应转换为恒无功控制。因此可通过无功互补约束来描述 GFM 变流器的控制模式转换，如式(3)所示。

$$\begin{cases}Q_{\mathrm{M}i}=Q_{\mathrm{Mref}i}+\left(U_{\mathrm{Mref}i}-U_{\mathrm{a}i}-U_i\right)/n_{\mathrm{q}i}\\ \left(Q_{\mathrm{M}i\max}-Q_{\mathrm{M}i}\right)U_{ai}=0\\ Q_{\mathrm{M}i\min}\le Q_{\mathrm{M}i}\le Q_{\mathrm{M}i\max},\ U_{\mathrm{a}i}\ge 0\end{cases} \tag{3}$$

式中：$Q_{\mathrm{M}i\min}$ 为 $Q_{\mathrm{M}i}$ 的下限值；$U_{\mathrm{a}i}$ 为辅助变量，用于反映 GFM 变流器的输出无功达到上限后并网点电压的变化量。

2.2 广义短路比理论及其推广应用

SCR 被广泛应用于单个新能源电力电子设备的并网稳定性分析[13-15,21]，其中文献[21]提出，可根据 GFL 变流器的控制参数和特性得到其临界 SCR (critical SCR, CSCR)，当 SCR 小于 CSCR 时，即认为 GFL 变流器存在小扰动失稳风险。然而，SCR 仅适用于单馈入系统而不适用于多馈入系统，因为其没有考虑设备之间的相互影响。

2.2.1 广义短路比

针对多馈入系统的电网强度表征问题，文献[21]对 SCR 进行推广并严格证明了 gSCR 可用于评估多馈入系统的小扰动稳定性，其定义如下：

$$g_{\mathrm{SCR}}=\min\mathrm{eig}\left(\boldsymbol{S}_{\mathrm{G}}^{-1}\boldsymbol{B}_m\right) \tag{4}$$

式中：g_{SCR} 为广义短路比；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{G}}=\mathrm{diag}\{S_{\mathrm{G}i}\}\in\mathbf{R}^{n\times n}$；$n$ 为接入 GFL 变流器的节点数；$S_{\mathrm{G}i}$ 为节点 i 的 GFL 变流器额定容量；$\boldsymbol{B}_m\in\mathbf{R}^{n\times n}$ 为仅保留 GFL 变流器母线的工频电纳矩阵，计算如式(5)；eig(·)为求矩阵特征值。

$$\boldsymbol{B}_m=\boldsymbol{B}_{nn}-\boldsymbol{B}_{nm}\left(\boldsymbol{B}_{mm}\right)^{-1}\boldsymbol{B}_{mn} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{B}_{nn}$、$\boldsymbol{B}_{nm}$、$\boldsymbol{B}_{mn}$ 和 $\boldsymbol{B}_{mm}$ 均为整个系统工频电纳矩阵 $\boldsymbol{B}\in\mathbf{R}^{(n+m)\times(n+m)}$的子矩阵；$m$ 为没有 GFL 变流器接入的节点数。

gSCR 作为 SCR 的推广，其临界 gSCR (Critical gSCR，CgSCR)也等于单馈入系统的 CSCR，因此当各个新能源设备的控制结构和参数已知时，分别搭建单机无穷大系统即可得到各个单馈入系统的 CSCR，其中最大的 CSCR 即为系统的 CgSCR。

2.2.2 考虑 GFM 变流器影响的广义短路比

式(4)的 g_{SCR} 计算基于所有新能源设备均为 GFL 控制并且设备动态外特性相似的假设。考虑同时包含 GFL 和 GFM 变流器的“异构”系统时，需对 g_{SCR} 进行修正，即在 GFL 变流器锁相环主导的小扰动失稳频段范围内，GFM 变流器可近似等效为一个含内部电感的接地电压源[22]。因此，可将 GFM 变流器等效为一个对地电抗/电纳支路，并且该电抗/电纳值与 GFM 变流器容量有关。考虑 GFM 变流器对 g_{SCR} 的修正如下：

$$g'_{\mathrm{SGR}}=\min\mathrm{eig}\left(\boldsymbol{S}_{\mathrm{G}}^{-1}\boldsymbol{B}'_m\right) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{B}'_m=\boldsymbol{B}_{nn}-\boldsymbol{B}_{nm}\left(\boldsymbol{B}'_{mm}\right)^{-1}\boldsymbol{B}_{mn} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{B}'_{mm}=\boldsymbol{B}_{mm}+\boldsymbol{S}_{\mathrm{M}}B_{\mathrm{p}} \tag{8}$$

式中：g'_{SGR} 为考虑 GFM 变流器对系统进行修正后的广义短路比；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{M}}=\mathrm{diag}\{S_{\mathrm{M}i}\}\in\mathbf{R}^{m\times m}$，当节点 i 没

有 GFM 变流器接入时，视 $S_{\mathrm{M}i}$=0；$S_{\mathrm{M}i}$ 为节点 i 的 GFM 变流器额定容量；$\boldsymbol{B}'_{mm}\in\mathbf{R}^{m\times m}$ 为考虑 GFM 变流器的等效电纳支路后对 $\boldsymbol{B}_{mm}$ 进行修正得到的矩阵；$\boldsymbol{B}'_{m}\in\mathbf{R}^{n\times n}$ 为考虑 GFM 变流器的等效电纳支路后仅保留 GFL 变流器母线的工频电纳矩阵；B_{p} 为单位容量 GFM 变流器的等效电纳。

2.2.3 广义运行短路比

2.2.1 节和 2.2.2 节中的 g_{SCR} 均定义在额定工况下，即假设各 GFL 和 GFM 变流器的有功功率等于变流器的额定容量。为了更准确地分析实际运行情况下的小扰动稳定性，文献[23]将 gSCR 推广到非额定工况下的 gOSCR，其定义如下：

$$g_{\mathrm{OSCR}}=\min \mathrm{eig}\left(\boldsymbol{U}^2\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}^{-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{G}}\right) \tag{9}$$

式中：g_{OSCR} 为广义运行短路比；$\boldsymbol{U}^2=\mathrm{diag}\{U_i^2\}\in\mathbf{R}^{N_{\mathrm{G}}\times N_{\mathrm{G}}}$；$\boldsymbol{B}_{\mathrm{G}}\in\mathbf{R}^{N_{\mathrm{G}}\times N_{\mathrm{G}}}$ 为仅保留 GFL 变流器有功注入节点的工频电纳矩阵；$P_{\mathrm{G}i}$ 为节点 i 的 GFL 变流器的有功功率；N_{G} 为 GFL 变流器有功注入节点数；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}=\mathrm{diag}\{P_{\mathrm{G}i}\}\in\mathbf{R}^{N_{\mathrm{G}}\times N_{\mathrm{G}}}$。$g_{\mathrm{OSCR}}$ 可以考虑有功功率和节点电压的变化，更符合实际运行情况。因此，本文建立的 GFM 变流器优化配置模型将基于 g_{OSCR} 进行建模与分析。

3 送出系统构网型变流器优化配置模型

本章提出一个提高新能源基地经柔直送出系统的送出能力和小扰动稳定性的 GFM 变流器优化配置模型。模型中采用广义运行短路比约束替代小扰动稳定约束以避免计算整个系统的小扰动全状态方程。

3.1 目标函数

以最小化 GFM 变流器的总容量(即总成本)为目标，如式(10)所示。

$$\min\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{RE}}}\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}}\beta_{ik}S_{\mathrm{M}ik} \tag{10}$$

式中：N_{RE} 为基地中的新能源场站(节点)数；N_{M} 为新能源场站节点 i 的 GFM 变流器待选容量档位数；$S_{\mathrm{M}ik}$ 为待选的第 k 个档位的 GFM 变流器容量；β_{ik} 为 0-1 变量，β_{ik}=1 时表示在节点 i 安装第 k 个容量档位的 GFM 变流器。

3.2 系统送出能力约束

和电力系统静态电压稳定裕度的计算类似，送出能力可通过引入直流线路功率增长参数 λ 的最优潮流模型直接计算[24]，由于忽略了受端 VSC 换流站，送端 VSC 换流站直流侧的最大输电功率值即为系统的送出能力。因此，系统的送出能力约束如式(11)—(15)所示。其中，式(11)为基地交流汇集网络节点的功率平衡方程、式(12)为连接 VSC 换流站的交流节点的功率平衡方程，式(13)为送端 VSC 换流站的运行特性方程。式(14)为直流线路功率增长量在各个新能源站的分配系数。式(15)中要求送出功率增长参数 λ 不小于给定的最小值 λ_0，即要求系统送出能力不低于所需要的最小值。由于目前 GFL 控制的变流器通常都工作在功率因数接近 1 的状态，因此本文假定 GFL 变流器不输出无功功率，故式(11)的第 2 式中新能源场站无功出力就只有 GFM 变流器输出无功 $Q_{\mathrm{M}i}$。

$$\begin{cases}P_{\mathrm{RE}i0}+\lambda b_{\mathrm{RE}i}^{\mathrm{P}}-U_i\sum_{j=1}^{n_{\mathrm{b}}}U_j(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij})=0\\ Q_{\mathrm{M}i}-U_i\sum_{j=1}^{n_{\mathrm{b}}}U_j(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij})=0\end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases}-U_i\sum_{j=1}^{n_{\mathrm{b}}}U_j(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij})-P_{\mathrm{V}}=0\\ -U_i\sum_{j=1}^{n_{\mathrm{b}}}U_j(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij})-Q_{\mathrm{V}}=0\end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases}P_{\mathrm{V}}-\mu M/\sqrt{2}\cdot U_iU_{\mathrm{d}}Y\sin(\delta-\gamma)-U_i^2Y\sin\gamma=0\\ Q_{\mathrm{V}}+\mu M/\sqrt{2}\cdot U_iU_{\mathrm{d}}Y\cos(\delta-\gamma)-U_i^2Y\cos\gamma=0\\ P_{\mathrm{d}0}+\lambda b_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{P}}-\mu M/\sqrt{2}\cdot U_iU_{\mathrm{d}}Y\sin(\delta+\gamma)+\\ \quad(\mu MU_{\mathrm{d}}/\sqrt{2})^2Y\sin\gamma=0\end{cases} \tag{13}$$

$$b_{\mathrm{RE}i}^{\mathrm{P}}=\frac{P_{\mathrm{RE}i\max}-P_{\mathrm{RE}i0}}{\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{RE}}}\left(P_{\mathrm{RE}j\max}-P_{\mathrm{RE}j0}\right)}\cdot b_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{P}} \tag{14}$$

$$\lambda\geq\lambda_0 \tag{15}$$

式中：n_{b} 为系统的交流节点数；θ_{ij} 为节点 i 和 j 之间的相角差；G_{ij} 和 B_{ij} 分别为工频节点导纳矩阵的第 i 行 j 列的电导和电纳；$P_{\mathrm{RE}i0}$ 和 $P_{\mathrm{RE}i\max}$ 为节点 i 的新能源站初始有功功率及其最大值；$b_{\mathrm{RE}i}^{\mathrm{P}}$ 为节点 i 的新能源电站输出有功功率的增长方式，计算如式(14)所示，即每个新能源电站按照其有功出力裕度占新能源总有功出力裕度的比例来分配 VSC-HVDC 线路有功功率的增长量。$b_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{P}}$ 为 VSC-HVDC 线路有功功率的增长方式；P_{V} 和 Q_{V} 分别为 VSC 换流站从交流侧流入直流侧的有功和无功功率；VSC 换流站的相关变量 μ、M、Y、γ、δ 的物理意义可参见文献[24]。$P_{\mathrm{d}0}$ 为直流线路的初始

有功功率；U_{d} 为送端 VSC 换流站的直流电压，本文假设其保持恒定。

3.3 GFM 变流器无功功率互补约束

GFM 变流器无功功率互补约束基于式(3)进行修改，GFM 变流器的容量为待求变量，其无功功率上下限也是与变流器容量有关的待求变量。

$$\begin{cases} Q_{\mathrm{M}i}=(Q_{\mathrm{M}i0}+(U_{\mathrm{Mref}i}-U_{\mathrm{a}i}-U_i)/n_{\mathrm{q}i})\cdot\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}}\beta_{ik} \\ (\sin\varphi\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}}\beta_{ik}S_{\mathrm{M}ik}-Q_{\mathrm{M}i})U_{\mathrm{a}i}=0 \\ -\sin\varphi\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}}\beta_{ik}S_{\mathrm{M}ik}\le Q_{\mathrm{M}i}\le\sin\varphi\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}}\beta_{ik}S_{\mathrm{M}ik},\ U_{\mathrm{a}i}\ge 0 \end{cases} \tag{16}$$

式中：$Q_{\mathrm{M}i0}$ 为 $Q_{\mathrm{M}i}$ 在初始运行点的值；当节点 i 没有配置 GFM 变流器时，$Q_{\mathrm{M}i}$ =0。φ 为 GFM 变流器的功率因数角。

3.4 GFL 和 GFM 变流器容量约束

包括新能源场站的总容量约束和变流器配置约束。本文假设单个新能源场站中同类型(GFL 或 GFM)变流器统一采用外特性相同的控制参数，从而将其等效聚合为一个同类型(GFL 或 GFM)变流器[15]。因此，单个新能源场站中安装变流器只可能存在 3 种情况，即 1 个 GFL 变流器、1 个 GFM 变流器、1 个 GFL 和 1 个 GFM 变流器，如下：

$$\begin{cases} S_{\mathrm{RE}i}=\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{L}}}\alpha_{ik}S_{\mathrm{G}ik}+\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}}\beta_{ik}S_{\mathrm{M}ik} \\ \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{L}}}\alpha_{ik}\le 1,\ \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}}\beta_{ik}\le 1 \\ \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{L}}}\alpha_{ik}+\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}}\beta_{ik}\ge 1 \end{cases} \tag{17}$$

式中：$S_{\mathrm{RE}i}$ 为节点 i 的新能源场站的总容量；N_{L} 为节点 i 的新能源场站的 GFL 变流器容量档位数；$S_{\mathrm{G}ik}$ 为节点 i 的第 k 个档位的 GFL 变流器容量；α_{ik} 为 0-1 变量，α_{ik}=1 时表示在节点 i 安装第 k 个容量档位的 GFL 变流器。

3.5 初始运行点状态约束

包括初始运行点潮流约束和变流器容量约束。初始运行点潮流约束与 3.2 节中的式(11)—(13)类似，只需将式(11)中的 $\lambda b_{\mathrm{RE}i}^{\mathrm{P}}$ 项和式(13)中的 $\lambda b_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{P}}$ 项删去，再将式(11)—(13)中的 U_i，U_j，θ_{ij}，$Q_{\mathrm{M}i}$，P_{V}，Q_{V} 和 δ 均改为初始运行点的变量 U_{i0}，U_{j0}，θ_{ij0}，$Q_{\mathrm{M}i0}$，$P_{\mathrm{V}0}$，$Q_{\mathrm{V}0}$ 和 δ_0 即可。GFL 和 GFM 变流器在初始运行点的功率需小于等于其容量，如下：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{RE}i0}=P_{\mathrm{G}i0}+P_{\mathrm{M}i0} \\ 0\le P_{\mathrm{G}i0}\le\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{L}}}\alpha_{ik}S_{\mathrm{G}ik} \\ 0\le S_{\mathrm{M}i0}\le\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}}\beta_{ik}S_{\mathrm{M}ik} \\ Q_{\mathrm{M}i0}=P_{\mathrm{M}i0}\tan\varphi,\ S_{\mathrm{M}i0}^2=P_{\mathrm{M}i0}^2+Q_{\mathrm{M}i0}^2 \end{cases} \tag{18}$$

式中：$P_{\mathrm{G}i0}$ 和 $P_{\mathrm{M}i0}$ 分别为节点 i 的 GFL 和 GFM 变流器在初始运行点输出的有功功率，二者之和等于 $P_{\mathrm{RE}i0}$。$S_{\mathrm{M}i0}$ 为节点 i 的 GFM 变流器在初始运行点的视在功率。

3.6 广义运行短路比约束

包括 GFL 变流器有功注入节点数计算约束，GFM 变流器和送端 VSC 换流站对系统电纳矩阵的修正约束，以及 gOSCR 约束，如式(19)—(21)：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}i0}\le\tau_i\Phi,\ P_{\mathrm{G}i0}\ge\varepsilon-\Phi(1-\tau_i) \\ N_{\mathrm{G}}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{RE}}}\tau_i,\ \tau_i\in\{0,1\} \end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases} S_{\mathrm{V}0}^2=P_{\mathrm{V}0}^2+Q_{\mathrm{V}0}^2 \\ \boldsymbol{B}''=\boldsymbol{B}'+\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{\mathrm{M}0}B_{\mathrm{p}} & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & 0\\ 0 & S_{\mathrm{V}0}B_{\mathrm{pV}}\end{bmatrix} \end{cases} \tag{20}$$

$$g_{\mathrm{OSCR}}=\min\mathrm{eig}\left(\boldsymbol{U}^2\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}0}^{-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{G}}\right)\ge C_{\mathrm{gSCR}} \tag{21}$$

式中：Φ 和 ε 分别为很大和很小的正数；τ_i 为 0-1 变量，0 和 1 分别表示节点 i 是否有 GFL 变流器有功功率注入；$S_{\mathrm{V}0}$ 为初始运行点处送端 VSC 换流站的视在功率；$\boldsymbol{B}'\in\mathbf{R}^{(N_{\mathrm{RE}}+1)\times(N_{\mathrm{RE}}+1)}$ 为配置 GFM 变流器前仅保留新能源和 VSC 换流站母线的工频节点电纳矩阵；$\boldsymbol{B}''\in\mathbf{R}^{(N_{\mathrm{RE}}+1)\times(N_{\mathrm{RE}}+1)}$ 为计及构网型变流器和 VSC 换流站母线的等效电纳后对 $\boldsymbol{B}'$ 修正得到的矩阵；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{M}0}=\mathrm{diag}\{S_{\mathrm{M}i0}\}\in\mathbf{R}^{N_{\mathrm{RE}}\times N_{\mathrm{RE}}}$；$B_{\mathrm{pV}}$ 为单位容量 VSC 换流站的等效电纳。$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}0}=\mathrm{diag}\{P_{\mathrm{G}i0}\}\in\mathbf{R}^{N_{\mathrm{G}}\times N_{\mathrm{G}}}$。$\boldsymbol{0}\in\mathbf{R}^{N_{\mathrm{RE}}\times N_{\mathrm{RE}}}$ 为 N_{RE} 阶全零矩阵。C_{gSCR} 为临界广义短路比。

因此，上面式(10)—(21)和初始运行点的潮流约束就构成了新能源基地经柔直送出系统的 GFM 变流器优化配置模型。

4 模型求解方法

由式(21)可见，所提出的 GFM 变流器优化配置模型中包含矩阵最小特征值计算约束，但是现有求解器均无法直接求解含有矩阵特征值计算约束的优化模型。因此，本文引入非负矩阵 Perron 根的边界

值，将矩阵特征值约束转化为多个代数不等式约束，从而将优化配置模型转化为可以直接求解的MINLP模型。

4.1 非负矩阵 Perron 根的边界值

设 $\boldsymbol{A}$ 为 n 阶非负矩阵，$\boldsymbol{A}$ 的 Perron 根为其特征根的最大值，记为 $\rho(\boldsymbol{A})$。由圆盘定理可知，$\rho(\boldsymbol{A})$的范围满足式(22)：

$$\min_e r_e(\boldsymbol{A}) \le \rho(\boldsymbol{A}) \le \max_e r_e(\boldsymbol{A}) \tag{22}$$

式中：$r_e(\boldsymbol{A})$为矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的第 e 行元素之和。

然而，式(22)得到的 Perron 根的边界值精度不高，并不足以满足实际工程需求。文献[25]提出，当 $r_e(\boldsymbol{A})\neq 0$ 时，可以得到一个具有较高精度的非负矩阵 Perron 根的边界值，且其形式简洁，适用于优化问题的求解，其表达式如式(23)所示。

$$\min_e\left(\frac{r_e\left(\boldsymbol{A}^t\boldsymbol{D}^h\right)}{r_e\left(\boldsymbol{D}^h\right)}\right)^{1/t} \le \rho(\boldsymbol{A}) \le \max_e\left(\frac{r_e\left(\boldsymbol{A}^t\boldsymbol{D}^h\right)}{r_e\left(\boldsymbol{D}^h\right)}\right)^{1/t} \tag{23}$$

式中：t 和 h 均为正整数。矩阵 $\boldsymbol{D}=f(\boldsymbol{A})$为关于矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的正系数多项式，由于多项式的系数为正数，并且 $r_e(\boldsymbol{A})\neq 0$，因此 $r_e(\boldsymbol{D})\neq 0$，$r_e(\boldsymbol{D}^h)\neq 0$，$r_e(\boldsymbol{A}^t\boldsymbol{D}^h)\neq 0$。

4.2 广义运行短路比约束的转化

由式(21)可知 g_{OSCR} 等于拓展电纳矩阵的最小特征值，而由矩阵特征值的性质可知，矩阵与其逆矩阵的特征值互为倒数，即：

$$g_{\mathrm{OSCR}} = \min \mathrm{eig}\left(\boldsymbol{U}^2\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0}}^{-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{G}}\right) = \frac{1}{\max \mathrm{eig}\left(\boldsymbol{X}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0}}\boldsymbol{U}^{-2}\right)} \tag{24}$$

式中：当忽略线路电阻时，矩阵 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{G}}$ 和 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{G}}$ 存在以下关系[26]：

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{G}} = \left[\left|X_{ij}\right|\right]_{N_{\mathrm{G}}\times N_{\mathrm{G}}} = \boldsymbol{B}_{\mathrm{G}}^{-1} \tag{25}$$

式中：X_{ij} 为仅保留 GFL 变流器母线的电抗矩阵的第 i 行 j 列元素。因此，拓展电抗矩阵 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0}}\boldsymbol{U}^{-2}$ 中的元素均为非负数，可采用非负矩阵 Perron 根的边界值对广义运行短路比约束进行近似与转化。

矩阵特征根的最大值为其 Perron 根，即：

$$\max \mathrm{eig}\left(\boldsymbol{X}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0}}\boldsymbol{U}^{-2}\right) = \rho\left(\boldsymbol{X}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0}}\boldsymbol{U}^{-2}\right) \tag{26}$$

令 $\boldsymbol{A}=\boldsymbol{X}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0}}\boldsymbol{U}^{-2}$，并对式(23)的右半部分取倒数可得：

$$\min\left(r_e\left(\boldsymbol{D}^h\right)/r_e\left(\boldsymbol{A}^t\boldsymbol{D}^h\right)\right)^{1/t} \le 1/\rho(\boldsymbol{A}) = g_{\mathrm{OSCR}} \tag{27}$$

因此，广义运行短路比约束(21)可转化为：

$$C_{\mathrm{gSCR}} \le \min\left(r_e\left(\boldsymbol{D}^h\right)/r_e\left(\boldsymbol{A}^t\boldsymbol{D}^h\right)\right)^{1/t} \tag{28}$$

由于减少除法和 min 运算可提高优化模型的求解效率，因此将式(28)修改为多个不等式约束：

$$C_{\mathrm{gSCR}} \cdot \left(r_e\left(\boldsymbol{A}^t\boldsymbol{D}^h\right)\right)^{1/t} \le \left(r_e\left(\boldsymbol{D}^h\right)\right)^{1/t}, i = 1,2,\cdots,N_{\mathrm{RE}} \tag{29}$$

将广义运行短路比约束转化为如式(29)的多个不等式约束后，送出系统 GFM 变流器优化配置模型就可转化为如式(30)的 MINLP 模型。因此，可以调用商业优化软件 GAMS 中的 SBB 求解器直接对其进行求解。

$$\min \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{RE}}}\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{M}}} \beta_{ik} S_{\mathrm{M}ik}$$

s.t. 式(11)—(19)及初始运行点的潮流约束：

$$\begin{cases} S_{\mathrm{V0}}^2 = P_{\mathrm{V0}}^2 + Q_{\mathrm{V0}}^2 \\ \boldsymbol{X}'' = \boldsymbol{X}' + \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}_{\mathrm{M0}}^{-1}/B_{\mathrm{p}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & 0 \\ 0 & 1/\left(S_{\mathrm{V0}}B_{\mathrm{pV}}\right) \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{A} = \boldsymbol{X}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0}}\boldsymbol{U}^{-2} \\ C_{\mathrm{gSCR}} \cdot \left(r_e\left(\boldsymbol{A}^t\boldsymbol{D}^h\right)\right)^{1/t} \le \left(r_e\left(\boldsymbol{D}^h\right)\right)^{1/t}, i = 1,2,\cdots,N_{\mathrm{RE}} \end{cases} \tag{30}$$

式中：$\boldsymbol{X}' \in \mathbf{R}^{(N_{\mathrm{RE}}+1)\times(N_{\mathrm{RE}}+1)}$ 为配置 GFM 变流器前仅保留新能源和 VSC 换流站母线的工频节点电抗矩阵；$\boldsymbol{X}'' \in \mathbf{R}^{(N_{\mathrm{RE}}+1)\times(N_{\mathrm{RE}}+1)}$ 为计及 GFM 变流器和 VSC 换流站母线的等效电抗后对 $\boldsymbol{X}'$ 修正得到的矩阵。

5 算例分析

为了验证所提出的 GFM 变流器优化配置模型和求解方法的正确有效性，以西南地区某个新能源基地经柔直送出系统为测试算例。送出系统的结构图如图 2 所示。基地中各个新能源场站的总容量为 13 000 MVA，其中 47 个光伏电站分别连接在节点 105—151，1 个风电场连接在节点 152。新能源场站发出的电力由一个三级升压交流集电网络汇集，将新能源机组/单元端电压升压至 35 kV、220 kV 和 500 kV，最后由柔直输电系统送至远方负荷中心。算例设置的 GFL 和 GFM 变流器待选容量的最小值、最大值和档位间隔分别为 50 MVA、300 MVA 和 50 MVA，即 $N_{\mathrm{L}}=N_{\mathrm{M}}=6$。算例选取的基准容量为 100 MVA，基准电压为平均额定电压。算例测试在 MATLAB R2022a 和 GAMS Studio 42 软件平台进行编程。

5.1 临界广义短路比 CgSCR 计算

基于 gSCR 的“源网分离”的思想，构造 GFL 变流器的单机无穷大并网系统，GFL 变流器的全状态方程和控制参数分别如附录 A 中式(A1)—(A3)和附录 B 中表 B1 所示。先计算单机无穷大并网系统的潮流，获取电压幅值和相角等变量的取值，再通

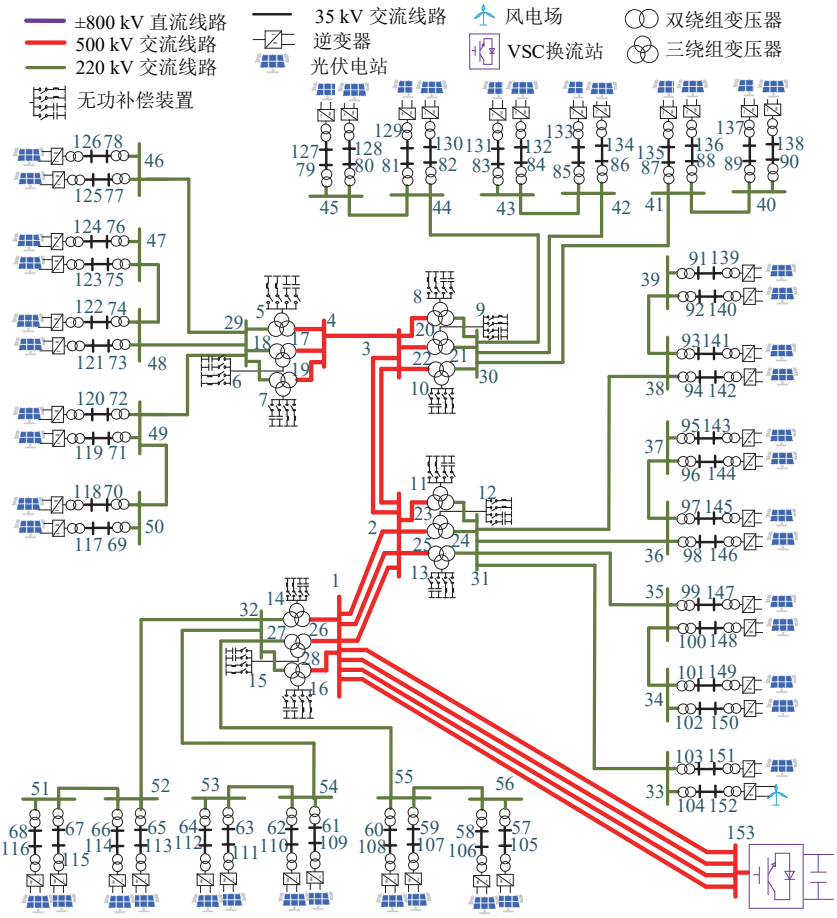


图 2 西南地区某个新能源基地经柔直送出系统结构图

Fig.2 Wiring diagram of a renewable generation base transmitted by VSC-HVDC system in Southwest region

过小扰动分析法求解单机无穷大并网系统的主导特征根，通过不断修改并网线路的距离直至主导特征根实部为 0，此时对应的短路比即为 GFL 变流器的 CSCR。通过计算得到 GFL 变流器的 CSCR 为 3.030 4，因此送出系统的 C_{gSCR}=3.030 4。

5.2 非负矩阵 Perron 根的边界值估计的参数选择

理论上 t 和 h 的取值越大，利用边界值估计 $\rho(\boldsymbol{A})$ 越准确。然而，矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中包含待求变量，t 和 h 的取值过大会导致变量相乘次数过多从而增加 MINLP 模型的求解时间，因此对 t 和 h 取值时需同时考虑估计精度和模型的求解时间。

下面将(t, h)设置为不同的取值组合，分别计算边界值估计的精度和模型的求解时间。将矩阵 $\boldsymbol{D}$ 取为 $\boldsymbol{A}$ 的二阶多项式，如式(31)，其中多项式系数取值为：η_1=0.1，η_2=0.5，η_3=0.8。

$$\boldsymbol{D}=\eta_1\boldsymbol{I}+\eta_2\boldsymbol{A}+\eta_3\boldsymbol{A}^2 \tag{31}$$

计算估计精度时暂时不考虑 GFM 变流器和 VSC 换流站母线的等效电抗，即将矩阵 $\boldsymbol{X}'$ 的前 N_{RE} 行前 N_{RE} 列作为 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{G}}$；假设 N_{G}=N_{RE}，即每个新能源节点均有 GFL 变流器的有功功率注入；对于对角矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{G0}}\boldsymbol{U}^{-2}$，随机设置为对角元素值在[0, 3] pu 之间的对角矩阵。随机生成 100 个矩阵 $\boldsymbol{A}$，其 Perron 根和最大边界值的平均相对误差(mean relative error, MRE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)以及模型的求解时间如表 1 所示。由表 1 可见，当 t≥2 时，Perron 根和最大边界值的 MRE、RMSE 以及 MAE 这 3 种误差均小于 0.5%。然而，(t, h)取值为(2, 2)和(3, 3)时模型的求解时间都大大增加，且(t, h)取值为(2, 2)的估计精度相比于取值为(2, 1)并没有显著提升。因此，综合比较估计精度和求解时间，(t, h)取值为(2, 1)是较好的选择，其估计精度较高，可以用于求解 GFM 变流器优化配置模型，且求解时间也在可接受范围之内。

5.3 GFM 变流器优化配置结果分析

令(t,h)=(2,1)；cosφ=0.98；C_{gSCR}=3.030 4；λ_0=0.4；

假设单位容量下各 GFM 变流器的等效电纳为 1.3 pu(新能源自身基准容量下)[27]，假设单位容量下送端 VSC 换流站的等效电感为 0.14 pu(送端 VSC 换流站自身基准容量下)[22]。求解 GFM 变流器优化配置模型(30)，得到的各新能源场站的 GFL 和 GFM 变流器的容量配置结果如图 3 所示。

可以看到，优化配置结果中 GFL 和 GFM 变流器的总容量分别为 7 150 MVA 和 5 850 MVA，即整个新能源基地中 GFM 变流器的占比为 45%；另外，每个新能源场站中 GFM 变流器的占比并不都相同，最小和最大占比分别为 25%和 66.67%。可见，对于不同的新能源场站需要根据实际情况配置不同比例的 GFM 变流器。

对上面的优化配置结果进行小扰动稳定验证。优化配置前新能源基地中所有变流器均为 GFL 控制，即 $P_{\mathrm{REi}0}=P_{\mathrm{Gi}0}$。对优化配置前和配置后的送出系统计算出 g_{OSCR}，再通过小扰动分析法计算出其特征根。优化配置前和配置后的广义运行短路比如表 2 所示，优化配置前和配置后送出系统的特征根分别如图 4 和 5 所示(图中没有展示位于虚轴左边且距离虚轴较远的部分特征根)。由表 2 可见，优化配置前系统的 g_{OSCR}=2.257 1，小于 C_{gSCR}=3.030 4，因此系统存在小扰动失稳风险。优化配置后系统的 g_{OSCR}=3.837 3，大于临界值，因此优化后系统可以保持小扰动稳定。由图 4 可见，优化配置前系统中所有变流器均为 GFL 控制时，送出系统存在两个实部大于零的特征根，因此有小扰动失稳风险。由图 5 可见，优化配置后系统中同时有 GFL 和 GFM 变流器时，送出系统不存在实部大于零的特征根，并

表 1 非负矩阵 Perron 根的最大边界值的误差和求解时间

Table 1 Error of maximum boundary values of Perron roots of non negative matrix and the solution time

(t,h)	MRE/%	RMSE/%	MAE/%	求解时间/s
(1,1)	1.423	1.015	0.997	78
(1,2)	0.984	0.786	0.764	394
(2,1)	0.457	0.146	0.141	605
(2,2)	0.366	0.119	0.104	2 006
(3,3)	0.121	0.085	0.083	4 859

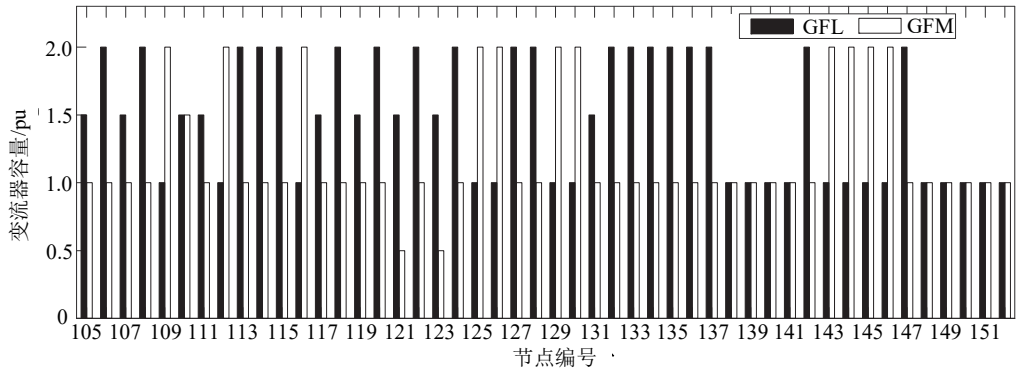


图 3 GFM 变流器优化配置结果

Fig.3 Optimal configuration results of GFM converters

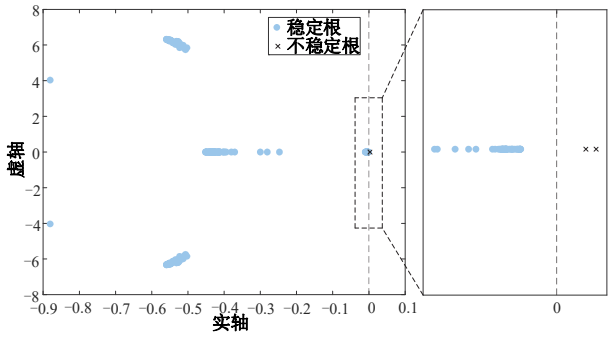


图 4 优化配置前的特征根

Fig.4 Eigenvalues before optimizing configuration

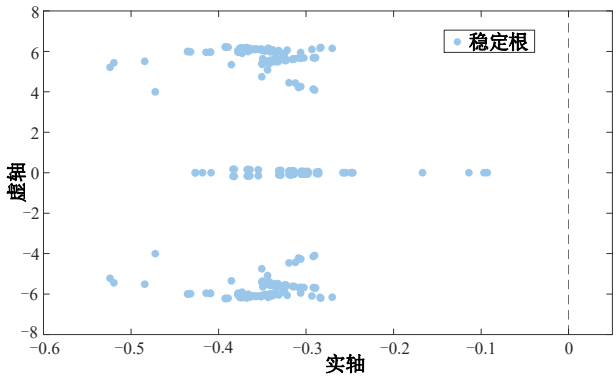


图 5 优化配置后的特征根

Fig.5 Eigenvalues after optimizing configuration

且距离零轴最近的特征根的实部为−0.093 0，因此优化配置后送出系统的小扰动稳定性得到了明显的提升。因此，所提出的 GFM 变流器优化配置模型式(30)获得的配置结果能够有效提升送出系统的小扰动稳定性。

对上面的优化配置结果对应的系统进行送出能力验证。分别计算优化配置前和配置后后系统的送出能力[5]，结果如表 3 所示。可以看到，优化配置后系统的功率增长参数达到 0.404 6，大于给定的所需功率增长参数最小值 λ_0，且送出能力增加了(14 054.4−12 000.2)=2 054.2 MW。由此可见，所提出的 GFM 变流器优化配置模型式(30)获得的配置结果能够满足系统所需的送出能力要求。

5.4 与其他优化配置方法对比

对于式(21)所示的矩阵特征值约束，除了本文提出的非负矩阵 Perron 根边界值近似方法，文献[27]提出了一种半正定规划方法，通过矩阵不等式的性质将特征值约束转化为一个矩阵半正定约束，从而得到一个半正定规划模型，如式(32)。下面将这种方法与所提出方法进行对比。

表 2 优化配置前和优化配置后的广义运行短路比

Table 2 gOSCR before and after optimized configuration

参数	优化配置前	优化配置后	
		模型(30)	模型(32)
g_{OSCR}	2.257 1	3.837 3	3.031 0

表 3 两种方法的送出能力对比

Table 3 Comparison of transfer capability between two methods

比较项	优化配置前	优化配置后	
		模型(30)	模型(32)
λ	0.199 3	0.404 6	0.350 4
送出能力/MW	12 000.2	14 054.4	13 512.1

$$\begin{cases}\min \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{RE}}} S_{\mathrm{M}i} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \boldsymbol{B}' + \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}'_{\mathrm{M}} B_{\mathrm{p}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & 0 \\ 0 & S_{\mathrm{V}} B_{\mathrm{pV}} \end{bmatrix} - C_{\mathrm{gSCR}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}'_{\mathrm{G}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \succeq 0 \\ S_{\mathrm{G}i} \geq 0,\ S_{\mathrm{M}i} \geq 0 \\ S_{\mathrm{RE}i} = S_{\mathrm{G}i} + S_{\mathrm{M}i} \end{cases} \end{cases} \tag{32}$$

式中：$\boldsymbol{S}'_{\mathrm{G}}=\mathrm{diag}\{S_{\mathrm{G}i}\} \in \mathbf{R}^{N_{\mathrm{RE}} \times N_{\mathrm{RE}}}$；$\boldsymbol{S}'_{\mathrm{M}}=\mathrm{diag}\{S_{\mathrm{M}i}\} \in \mathbf{R}^{N_{\mathrm{RE}} \times N_{\mathrm{RE}}}$；$\succeq 0$ 表示半正定矩阵；其余变量定义与式(20)相同；S_{V} 为送端 VSC 换流站的额定容量。

半正定规划模型(32)可以在 MATLAB 中调用 CVX 工具包中的 MOSEK 9.1.9 求解器进行求解，得到的 GFM 变流器优化配置结果如图 6 所示。可见，基于半正定规划方法得到的 GFL 和 GFM 变流器的总容量分别为 8 065.54 MVA 和 4 934.46 MVA，即整个新能源基地中 GFM 变流器的占比为 37.96%；另外，基于半正定规划方法得到的每个新能源场站中 GFM 变流器的占比也不相同；然而，该方法得到的变流器容量不是离散值，不符合实际工程中的容量配置要求，这是由于模型(32)中 GFL 和 GFM 变流器的配置容量均设置为连续值，而没有考虑实际工程配置的离散特性限制。

对基于半正定规划的优化配置结果进行小扰动稳定验证，优化配置后系统的 g_{OSCR} 如表 2 所示，特征根如图 7 所示（图中没有展示位于虚轴左边且距离虚轴较远的部分特征根）。由表 2 可见，此方法优化配置后系统的 g_{OSCR}=3.031 0，也大于临界值，因此优化后系统也可以保持小扰动稳定。由图 7 可见，使用基于半正定规划的方法进行优化配置后系统中也不存在不稳定根，并且距离零轴最近的特征根的实部为−0.007 0，因此优化配置后送出系统能够保持小扰动稳定运行，不过此特征值离虚轴较近。由于模型(32)为凸的半正定规划模型且模型中变流

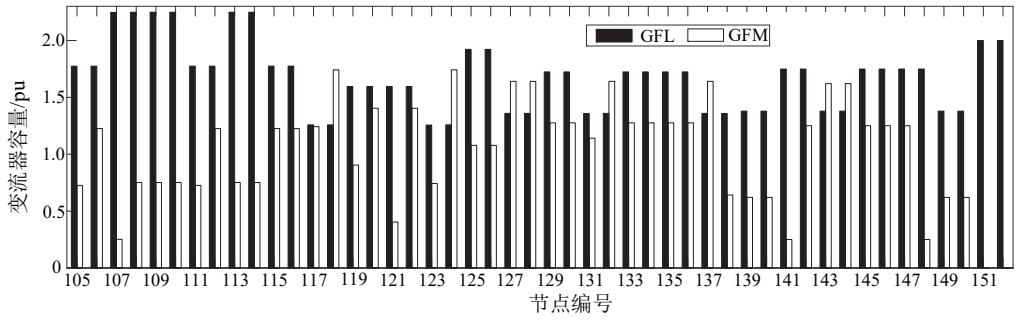


图 6 基于半正定规划方法的优化配置结果

Fig.6 Optimization configuration results based on semi positive definite programming method

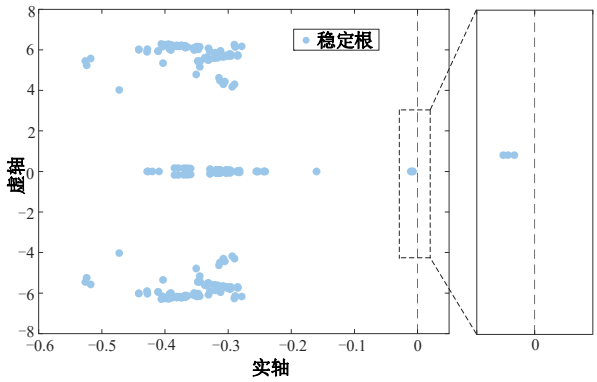


图 7 半正定规划方法优化配置后的特征根

Fig.7 Eigenvalues after optimizing configuration by semi positive definite programming method

器容量为连续值而不是离散值，因此更容易在约束边界上找到最优解，即 g_{OSCR} 满足最小要求的同时非常接近临界值 C_{gSCR}。

与所提出方法(模型式(30))相比，基于半正定规划的优化配置方法(模型式(32))没有考虑新能源基地经柔直送出系统的送出能力约束，因此即使模型式(32)得到的优化配置结果满足了小扰动稳定的要求，该结果有可能无法同时达到送出能力的要求。计算这两种方法优化配置结果对应系统的送出能力，结果对比如表 3 所示[5]。可以看到，通过两种方法配置一定比例的 GFM 变流器后，新能源基地经柔性直流送出系统的送出能力都有所提升。由于在算例中设置 λ_0 为 0.4，因此模型式(30)优化得到的送出功率增长参数 λ 大于 0.4；而模型式(32)由于没有考虑系统送出能力约束，其优化得到的 λ 仅为 0.350 4，这表明了所提方法在保证系统小扰动稳定运行的同时也能够满足系统所需的送出能力的要求。

6 结论

提出了一种新能源基地经柔直送出系统的 GFM 变流器优化配置方法，并通过算例分析得到结论如下：

1）所建立的 GFM 变流器优化配置模型考虑了 GFL 和 GFM 变流器的不同无功控制特性，及 GFM 变流器和送端 VSC 换流站对系统小扰动稳定性的影响，并能够避免求解系统的全状态方程；

2）所提出的 GFM 变流器优化配置模型得到的优化配置方案能够同时提高新能源基地经柔直送出系统的送出能力和小扰动稳定性；

3）引入的非负矩阵 Perron 根边界值估计方法具有足够高的精度，能够准确地近似模型中的含矩阵最小特征值计算约束，转化后的多个不等式约束使优化模型能够直接求解。

本文建立的优化配置模型为 MINLP 模型，其中的非线性约束使得此问题的求解难度较大，如何将模型中的非线性约束进行凸化以获得更好的解是未来的研究方向之一。此外，当新能源基地所在地区的天气条件发生变化时，各个新能源场站的出力也会跟着变化，从而引起系统潮流和 GFM 变流器初始运行点的变化，此时送出系统的 gOSCR 和稳定边界也发生了变化。因此，如何考虑新能源场站出力的不确定性对 GFM 变流器配置结果的影响也是未来的研究方向之一。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 舒印彪，陈国平，贺静波，等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[2] 俞晓峰，梁宇涛，肖昱杭，等. 大规模光伏并网位置和容量及输电网扩展的协同鲁棒规划方法[J/OL]. 南方电网技术，2025：1-11 [2025-06-30]. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250529.1006.002.
YU Xiaofeng, LIANG Yutao, XIAO Yuhang, et al. Coordinated robust planning method for large-scale photovoltaic grid-connected location and capacity and transmission network expansion[J/OL]. Southern Power System Technology, 2025: 1-11[2025-06-30]. https://link.cnki.net/urlid/44.1643. TK. 20250529.1006.002.

[3] 赖 信，林舜江，梁宇涛，等. 海上风电机组和集电网络的协调规划方法[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2819-2829.
LAI Xin, LIN Shunjiang, LIANG Yutao, et al. Coordinated planning approach for offshore wind farm turbines and collection networks[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2819-2829.

[4] 李 岩，辛清明，杨子千，等. 大规模新能源经柔性直流孤网送出系统的稳定新问题与控制方法[J]. 高电压技术，2025，51(11)：5354-5366.
LI Yan, XIN Qingming, YANG Ziqian, et al. Stability issues and control methods for large-scale renewable energy island transmission systems via VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(11): 5354-5366.

[5] CHEN S Y, LIN S J, YANG Y R, et al. Assessment and enhancement of transfer capability for large-scale renewable generation base transmitted by voltage source converter based high voltage direct current system[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2025, 165: 110506.

[6] 阳岳希，贺之渊，彭 程，等. 海上风电柔性直流外送系统主动支撑技术综述[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2720-2733.
YANG Yuexi, HE Zhiyuan, PENG Cheng, et al. Review on grid support control for VSC-HVDC connecting offshore wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2720-2733.

[7] SUN K Q, LIU Y L, XIAO H Q, et al. Cross-seam hybrid MTDC system for integration and delivery of large-scale renewable energy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1352-1362.

[8] 李 明，常永康，毛永涛，等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. 高电压技术，2024，50(11)：4773-4788.
LI Ming, CHANG Yongkang, MAO Yongtao, et al. Review and pro-

spect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4773-4788.
[9] MA F Y L, XIN H H, WU D, et al. Assessing small-signal grid strength of 100% inverter-based power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(5): 2784-2796.
[10] 王奕宁，向 往，张浩博，等. 构网型直驱风力发电机组比例优化配置分析[J]. 电网技术，2025，49(2)：490-500.
WANG Yining, XIANG Wang, ZHANG Haobo, et al. Analysis of optimal proportion configuration of grid forming direct drive wind turbine[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 490-500.
[11] 周于清，姚 伟，宗启航，等. 基于运行短路比的新能源场站中跟构网可切换单元的最优配置方法[J]. 电网技术，2024，48(3)：1091-1102.
ZHOU Yuqing, YAO Wei, ZONG Qihang, et al. Optimal configuration of grid-following/grid-forming switchable units in new energy stations based on operating short-circuit ratio[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1091-1102.
[12] 刘朋印，刘 辉，吴林林，等. 满足全运行域振荡约束的跟网-构网组合控制及优化配置[J]. 电力系统自动化，2024，48(12)：139-146.
LIU Pengyin, LIU Hui, WU Linlin, et al. Grid-following and grid-forming combined control and optimal configuration to satisfy oscillation constraints across whole operating region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 139-146.
[13] 辛焕海，王宇轩，刘晨曦，等. 提高新能源场站稳定性的构网型与跟网型变流器容量配比估算[J]. 中国电机工程学报，2024，44(14)：5463-5472.
XIN Huanhai, WANG Yuxuan, LIU Chenxi, et al. Estimation of capacity ratios between grid-forming and grid-following converters for improving the stability of renewable energy stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5463-5472.
[14] 吴 琛，刘晨曦，黄 伟，等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法[J]. 电力系统自动化，2023，47(12)：130-136.
WU Chen, LIU Chenxi, HUANG Wei, et al. Siting and sizing method of grid-forming converters for improving stability of power system with renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 130-136.
[15] 余光正，胡 越，刘晨曦，等. 含跟网/构网型混联多馈入系统协调优化配置方法[J]. 中国电机工程学报，2025，45(2)：588-600.
YU Guangzheng, HU Yue, LIU Chenxi, et al. Research on the coordinated optimization configuration method for hybrid multi-infeed systems with grid-following or grid-forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 588-600.
[16] 向 往，梅晓波，赵 峥，等. 内陆清洁能源基地±800 kV/10 000 MW 直流外送拓扑设计[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2052-2066.
XIANG Wang, MEI Xiaobo, ZHAO Zheng, et al. Topology design of ±800 kV/10 000 MW HVDC transmission for inland large-scale renewable energy bases[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2052-2066.
[17] 章浅诺，张哲任，金砚秋，等. 适用于超大规模海上风电并网的直流送出系统[J]. 电力自动化设备，2025，45(1)：106-114.
ZHANG Qiannuo, ZHANG Zheren, JIN Yanqiu, et al. DC transmission system suitable for ultra-large-scale offshore wind power grid-connected system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(1): 106-114.
[18] 张 兴，战祥对，吴孟泽，等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网混合模式控制综述[J]. 电力系统自动化，2024，48(21)：1-15.
ZHANG Xing, ZHAN Xiangdui, WU Mengze, et al. Review on grid-following/grid-forming hybrid mode control for grid-connected converter in high penetration rate of renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(21): 1-15.
[19] 迟永宁，江炳蔚，范译文，等. 构网型变流器：控制与稳定特性[J]. 高电压技术，2025，51(4)：1527-1542.
CHI Yongning, JIANG Bingwei, FAN Yiwen, et al. Grid-forming converters: control and behavior of stability[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1527-1542.
[20] MOAWWAD A, KHADKIKAR V, KIRTLEY J L. A new P-Q-V droop control method for an interline photovoltaic (I-PV) power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 658-668.
[21] XIN H H, LIU C X, CHEN X, et al. How many grid-forming converters do we need? A perspective from small signal stability and power grid strength[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(1): 623-635.
[22] 马富艺龙，辛焕海，刘晨曦，等. 新能源基地柔性直流送出系统小扰动电压支撑强度评估[J]. 电工技术学报，2023，38(21)：5758-5770，5938.
MA Fuyilong, XIN Huanhai, LIU Chenxi, et al. Small-disturbance system voltage support strength assessment method for renewables VSC-HVDC delivery system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5758-5770, 5938.
[23] LIU C X, XIN H H, WU D, et al. Generalized operational short-circuit ratio for grid strength assessment in power systems with high renewable penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(4): 5479-5494.
[24] 张芸烽，林舜江，杨悦荣，等. 考虑新能源高阶不确定性的交直流混联电网静态电压稳定裕度计算[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1631-1644.
ZHANG Yunfeng, LIN Shunjiang, YANG Yuerong, et al. Calculation of static voltage stability margin for AC/DC hybrid power system considering the high-order uncertainty of renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1631-1644.
[25] LIAO P. Bounds for the Perron root of nonnegative matrices and spectral radius of iteration matrices[J]. Linear Algebra and its Applications, 2017, 530: 253-265.
[26] 周瑀涵，辛焕海，鞠 平. 基于广义短路比的多馈入系统强度量化原理与方法：回顾、探讨与展望[J]. 中国电机工程学报，2023，43(10)：3794-3810.
ZHOU Yuhan, XIN Huanhai, JU Ping. System strength quantification principle and method of multi-infeed systems based on generalized short-circuit ratio: reviews, discussions and outlooks[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3794-3810.
[27] 孙荣富，袁 辉，王小路，等. 考虑小干扰同步稳定约束的电网新能源承载能力评估方法[J]. 电力系统自动化，2023，47(17)：47-56.
SUN Rongfu, YUAN Hui, WANG Xiaolu, et al. Assessment method for accommodable renewable energy capacity of grid considering small-signal synchronous stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 47-56.



陈仕原
2000—，男，硕士生
主要从事电力系统优化与控制的研究工作
E-mail: echenshiyuan@163.com
CHEN Shiyuan



林舜江(通信作者)
1980—，男，博士，研究员，博导
主要从事电力能源系统优化与控制的研究工作
E-mail: linshj@scut.edu.cn
LIN Shunjiang
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-03-25 在线出版日期 2025-07-23 编辑 陈 蔓

附录 A

GFL 变流器全状态方程如式(A1)—(A3)所示：

$$\begin{cases} \mathrm{d}\theta_{\mathrm{P}i}/\mathrm{d}t=(\omega_{\mathrm{P}i}-1)\omega_{\mathrm{n}} \\ \mathrm{d}\omega_{\mathrm{P}i}/\mathrm{d}t=k_{1i}-k_{2i}(U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{P}i}-U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{P}i})- \\ k_{3i}(\omega_{\mathrm{P}i}-1-k_{4i}(U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{P}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{P}i})(\omega_{\mathrm{P}i}-1)) \\ k_{1i}=K_{\mathrm{I}}(\omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{Pd}i}^{*}+R_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{Pq}i}^{*})/M_i, k_{2i}=K_{\mathrm{I}}/M_i \\ k_{3i}=-K_{\mathrm{I}}L_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{Pd}i}^{*}/M_i, k_{4i}=K_{\mathrm{P}}/M_i, M_i=1-K_{\mathrm{P}}L_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{Pd}i}^{*} \end{cases} \tag{A1}$$

$$\begin{cases} \mathrm{d}x_{\mathrm{P}i}/\mathrm{d}t=P_{\mathrm{em}i}^{*}-P_{\mathrm{em}i} \\ \mathrm{d}x_{\mathrm{Q}i}/\mathrm{d}t=Q_{\mathrm{em}i}^{*}-Q_{\mathrm{em}i} \\ I_{\mathrm{Pd}i}=K_{\mathrm{pgd}}(P_{\mathrm{em}i}^{*}-P_{\mathrm{em}i})+K_{\mathrm{igd}}x_{\mathrm{P}i} \\ I_{\mathrm{Pq}i}=K_{\mathrm{pgq}}(Q_{\mathrm{em}i}^{*}-Q_{\mathrm{em}i})+K_{\mathrm{igq}}x_{\mathrm{Q}i} \\ P_{\mathrm{em}i}=(U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{P}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{P}i})I_{\mathrm{Pd}i}- \\ (U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{P}i}-U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{P}i})I_{\mathrm{Pq}i}+(I_{\mathrm{Pd}i}^{2}+I_{\mathrm{Pq}i}^{2})R_{\mathrm{l}} \\ Q_{\mathrm{em}i}=-(U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{P}i}-U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{P}i})I_{\mathrm{Pd}i}- \\ (U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{P}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{P}i})I_{\mathrm{Pq}i}+(I_{\mathrm{Pd}i}^{2}+I_{\mathrm{Pq}i}^{2})X_{\mathrm{l}} \end{cases} \tag{A2}$$

$$\begin{cases} P_{\mathrm{GL}i}=(U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{p}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{p}i})I_{\mathrm{Pd}i}- \\ (U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{P}i}-U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{P}i})I_{\mathrm{Pq}i} \\ Q_{\mathrm{GL}i}=(U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{p}i}-U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{p}i})I_{\mathrm{Pd}i}- \\ (U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{P}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{p}i})I_{\mathrm{Pq}i} \end{cases} \tag{A3}$$

GFM 变流器的全状态方程如式(A4)—(A5)所示：

$$\begin{cases} \mathrm{d}\theta_{\mathrm{G}i}/\mathrm{d}t=(\omega_{\mathrm{G}i}-1)\omega_{\mathrm{n}} \\ J\mathrm{d}\omega_{\mathrm{G}i}/\mathrm{d}t=P_{\mathrm{T}i}^{*}/\omega_s+E_iB_{\mathrm{m}}(U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{G}i}-U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{G}i})- \\ E_i^{2}G_{\mathrm{m}}+E_iG_{\mathrm{m}}(U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{G}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{G}i})/\omega_s-D_{\mathrm{n}}(\omega_{\mathrm{G}i}-1) \\ Q_{\mathrm{T}i}^{*}=E_i^{2}B_{\mathrm{m}}+E_iB_{\mathrm{m}}(U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{G}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{G}i})- \\ E_iG_{\mathrm{m}}(U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{G}i}-U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{G}i})+D_{\mathrm{q}}(E_i-E_i^{*}) \end{cases} \tag{A4}$$

$$\begin{cases} P_{\mathrm{GM}i}=-(U_{\mathrm{x}i}^{2}+U_{\mathrm{y}i}^{2})G_{\mathrm{m}}+E_iG_{\mathrm{m}}(U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{G}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{G}i})- \\ E_iB_{\mathrm{m}}(U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{G}i}-U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{G}i}) \\ Q_{\mathrm{GM}i}=(U_{\mathrm{x}i}^{2}+U_{\mathrm{y}i}^{2})B_{\mathrm{m}}-E_iB_{\mathrm{m}}(U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{G}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{G}i})- \\ E_iG_{\mathrm{m}}(U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{G}i}-U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{G}i}) \end{cases} \tag{A5}$$

VSC 换流站全状态方程如式(A6)—(A7)所示：

$$\begin{cases} \mathrm{d}\theta_{\mathrm{v}i}/\mathrm{d}t=\omega_{\mathrm{ref}}\omega_{\mathrm{n}} \\ \mathrm{d}x_{\mathrm{d}i}/\mathrm{d}t=U_{\mathrm{sd}i}^{*}-U_{\mathrm{sd}i}, \mathrm{d}x_{\mathrm{q}i}/\mathrm{d}t=U_{\mathrm{sq}i}^{*}-U_{\mathrm{sq}i} \\ \mathrm{d}U_{\mathrm{cd}i}/\mathrm{d}t=(K'U_{\mathrm{cd}i}^{*}-U_{\mathrm{cd}i})/T_{\delta} \\ \mathrm{d}U_{\mathrm{cq}i}/\mathrm{d}t=(K'U_{\mathrm{cq}i}^{*}-U_{\mathrm{cq}i})/T_{\delta} \\ U_{\mathrm{cd}i}^{*}=K_{\mathrm{pcd}}(U_{\mathrm{sd}i}^{*}-U_{\mathrm{sd}i})+K_{\mathrm{icd}}x_{\mathrm{d}i}-X_{\mathrm{c}}I_{\mathrm{sq}i}, U_{\mathrm{cq}i}^{*}= \\ K_{\mathrm{pcq}}(U_{\mathrm{sq}i}^{*}-U_{\mathrm{sq}i})+K_{\mathrm{icq}}x_{\mathrm{q}i}+X_{\mathrm{c}}I_{\mathrm{sd}i} \\ U_{\mathrm{sd}i}=U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{V}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{V}i}+I_{\mathrm{sd}i}R_{\mathrm{t}}-I_{\mathrm{sq}i}X_{\mathrm{t}} \\ U_{\mathrm{sq}i}=-U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{V}i}+U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{V}i}+I_{\mathrm{sq}i}R_{\mathrm{t}}+I_{\mathrm{sd}i}X_{\mathrm{t}} \\ U_{\mathrm{cd}i}=U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{V}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{V}i}+ \\ I_{\mathrm{sd}i}(R_{\mathrm{t}}+R_{\mathrm{c}})-I_{\mathrm{sq}i}(X_{\mathrm{t}}+X_{\mathrm{c}}) \\ U_{\mathrm{cq}i}=-U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{V}i}+U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{V}i}+ \\ I_{\mathrm{sq}i}(R_{\mathrm{t}}+R_{\mathrm{c}})+I_{\mathrm{sd}i}(X_{\mathrm{t}}+X_{\mathrm{c}}) \end{cases} \tag{A6}$$

$$\begin{cases} P_{\mathrm{V}i}=(U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{V}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{V}i})I_{\mathrm{sd}i}- \\ (U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{V}i}-U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{V}i})I_{\mathrm{sq}i} \\ Q_{\mathrm{V}i}=(U_{\mathrm{y}i}\cos\theta_{\mathrm{V}i}-U_{\mathrm{x}i}\sin\theta_{\mathrm{V}i})I_{\mathrm{sd}i}- \\ (U_{\mathrm{x}i}\cos\theta_{\mathrm{V}i}+U_{\mathrm{y}i}\sin\theta_{\mathrm{V}i})I_{\mathrm{sq}i} \end{cases} \tag{A7}$$

附录 B

表 B1　跟网型变流器和构网型变流器的控制参数

Table B1　Control parameters of grid-following convertors and grid-forming convertors

变流器参数		数值	变流器参数		数值
跟网型变流器	S_{b}/kVA	1 500	构网型变流器	S_{b}/kVA	1 500
	U_{b}/V	690		U_{b}/V	690
	K_{P}, K_{I}	15,108		J	5
	K_{pgd}, K_{igd}	0.5,20		D_{n}	5
	K_{pgq}, K_{igq}	0.5,20		D_{q}	80

表 B2　VSC 换流站的控制参数

Table B2　Control parameters of VSC stations

参数	数值	参数	数值
额定有功功率	13 000 MW	额定直流电压	±800 kV
额定交流电压	500 kV	变压器漏感	0.1 pu
K'	8	K_{icd}	10
T_{δ}	9	K_{pcq}	10
K_{pcd}	10	K_{icq}	10