

跟网型和构网型变流器混合系统稳定性分析方法

王冠淇^{1,2}, 裴玮^{1,2*}, 熊佳旺^{1,2}, 李毅丰^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京市 海淀区 100190; 2. 中国科学院大学, 北京市 石景山区 100049)

Stability Analysis Method for Hybrid Systems of Grid-following and Grid-forming Inverters

WANG Guanqi^{1,2}, PEI Wei^{1,2*}, XIONG Jiawang^{1,2}, LI Yifeng^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Shijingshan District, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: To improve the insufficient voltage and frequency support of renewable energy power systems composed solely of grid-following (GFL) inverters, the current approach is to introduce grid-forming (GFM) inverters into the system and construct a GFL-GFM hybrid system, in order to fully leverage the support capabilities of grid-forming equipment and maintain the stability of the renewable energy power system. However, due to the significant differences in control strategies and external characteristics between GFL and GFM inverters, as well as the mutual coupling phenomenon between the various inverters, the stability mechanism analysis of future hybrid systems will be more complex. However, existing research mainly focuses on the stability analysis of a single type of inverter, without delving into the stability conditions and support mechanisms of GFL-GFM hybrid systems. To address this issue, this article has derived the key conditions for the stability of GFL-GFM hybrid systems and revealed the supporting mechanism of the inverters in the hybrid system. First, the stability conditions for the hybrid system are derived. On this basis, the "hybrid system support quantity" is defined to characterize the stability of the hybrid system, and the "improved short-circuit ratio" is further derived to characterize the strength of the hybrid system. Then, the influence of inverter parameters on system stability is analyzed, and the critical capacity proportion of the inverter is quantitatively obtained. Finally, the correctness of the theoretical analysis is verified through experiments.

KEY WORDS: grid-forming inverter (GFL); grid-following inverter (GFM); GFL-GFM hybrid system; hybrid system support capacity; improved static short-circuit ratio

摘要: 为改善以跟网型变流器(grid-following, GFL)为主体的新能源电力系统电压频率支撑力不足的情况,目前主流的研究趋势是在系统中引入构网型变流器(grid-forming, GFM),构建 GFL-GFM 混合系统来提高新能源电力系统的支撑能力,以保障系统的安全可靠运行。由于跟网型变流器和构网型变流器的控制策略及外特性具有较大差异,且各变流器间存在相互耦合的现象,混合系统的稳定性分析将更为复杂。然而,现有研究主要集中在对单一类型变流器的稳定性分析,未深入定量研究 GFL-GFM 混合系统的稳定性。为了解决这一问题,该文推导 GFL-GFM 混合系统稳定的关键条件,定义表征混合系统稳定性及强弱的关键量,并进一步揭示变流器参数及容量对比对混合系统稳定性的影响。首先,推导出混合系统的稳定条件;其次,基于稳定条件,定义“混合系统支撑量”来表征混合系统的稳定性,进一步推导“改进短路比”来表征混合系统的强弱;然后,分析变流器参数对系统稳定性的影响,并定量获得变流器的临界容量占比;最后,通过实验验证理论分析的正确性。

关键词: 构网型变流器; 跟网型变流器; GFL-GFM 混合系统; 混合系统支撑量; 改进短路比

0 引言

2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和是我国新能源电力系统发展的战略目标^[1]。为了实现“双碳”目标,我国正大规模发展新能源产业,加快新型电网建设。随着新能源渗透率的增加,电力系统的运行特性发生了深刻变化^[2]。传统电力系统采用化石能源,通过同步发电机组产生电力,为系统提供稳定的频率及电压支撑。然而,以新能源为主体的电力系统需要通过电力电子变流器实现自主构网,并由电力电子变流器为电网提供频率及电压的主动支撑^[3]。从控制策略的角度来看,变流器可分为两种基本类型:跟网型变流器(grid-following, GFL)^[4-6]和构网型变流器(grid-forming,

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23A20648); 中国科学院先导 B 专项项目(XDB0900100)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U23A20648); Chinese Academy of Sciences Pilot B Special Fund (XDB0900100).

GFM)^[7-9]。跟网型变流器通过锁相环(phase-locked loop, PLL)跟踪公共连接点(point of common coupling, PCC)的电压,以实现频率同步和功率控制^[4],其外特性可以被视为电流源。而与跟网型变流器不同,构网型变流器通过功率同步环来控制端口电压,并可以主动控制其自身输出频率,无需实时跟踪电网频率及相角,其外特性被视为电压源^[9]。

当前,跟网型变流器在实际工程中被广泛应用,但由于其无法为电力系统提供有效的电压和频率支撑,传统的同步发电机等设备仍然用于保持电力系统的稳定。随着同步发电机占比的降低,电网强度也随之下降,系统频率波动将愈加频繁^[8]。为确保高比例新能源电力系统的稳定运行,需要引入电压源型电力电子设备,如构网型变流器,构建新能源混合系统以维持电压和频率的稳定^[7]。对于风电和光伏场站,除了将部分储能通过构网型变流器并入电网,还可以改造风电和光伏的跟网型变流器,使其运行在构网模式下^[10-13]。无论是储能、光伏还是风电通过构网型变流器并网,其对外的输出特性均为电压源^[14]。

现有研究主要分析单一类型变流器的稳定性。文献[15]研究PLL的比例积分参数对跟网型变流器瞬态稳定性的影响;文献[16]进一步分析故障穿越过程中跟网型变流器的瞬态稳定性,并确定了故障穿越过程中平衡点存在的条件。而上述方法忽略了PLL中的关键非线性特性;文献[17]使用非线性动力学的平均方法,以获得跟网型变流器的稳定条件,但是该方法计算复杂,结果容易发散;文献[18]采用双重迭代等面积准则来评估两机跟网型变流器系统的瞬态稳定性,然而该方法并没有对跟网型变流器的稳定机理进行解释;文献[19]采用幅值映射模型来评估多机跟网型变流器系统的瞬态稳定性,并尝试定量分析系统的支撑能力;文献[20]利用李雅普诺夫法建立孤岛微电网的非线性模型,量化两机构网型变流器系统的吸引域;文献[21]建立同时使用下垂和虚拟同步机控制的双机构网型变流器系统的瞬态模型,并通过数值法获得相对保守的稳定区域;文献[22]基于惯性中心的概念,通过构造李雅普诺夫函数,研究多机构网型变流器的暂态稳定条件。

从研究内容来看,对单一类型变流器稳定性的研究已相对成熟,然而对电压频率的支撑需求驱使着未来系统朝多类型变流器混合系统发展。与单一

类型的跟网型或构网型变流器系统相比,当高比例新能源电力系统同时具有不同输出特性的跟网型和构网型变流器时,系统的稳定性变得更加复杂。文献[23]建立GFL-GFM混合系统的六阶瞬态模型,然而由于模型复杂度高,其稳定条件难以分析,而文献[24]建立跟网型变流器和构网型变流器双机系统的两阶非线性动力学模型,降低了混合系统稳定性分析的复杂程度,但没有进一步分析系统的稳定条件。文献[25-26]分别研究了由构网型变流器和同步发电机及构网型变流器和跟网型变流器组成的两机系统的暂态稳定性。其中文献[25]指出,同步发电机缓慢的原动机调速环节会恶化两机系统的暂态稳定性;文献[26]探讨跟网型变流器故障电流相位对两机系统暂态稳定性的影响,并指出若跟网型变流器在故障下注入无功电流,则可以提升系统的暂态稳定性。文献[27]引入一种改进的等面积标准,以评估跟网型变流器和构网型变流器之间相互作用所产生的负阻尼项的不利影响。在上述分析中,主要关注变流器的交流侧性能。同时为了简化高比例新能源电力系统稳定性分析的难度,将直流侧简化为电压源或电流源,从而更直接地评估变流器在实际电力系统中的作用,并探讨其对系统稳定性的影响机理。然而,上述研究仅对混合系统稳定性进行了定性分析,并未定量研究混合系统稳定性,并探究不同变流器占比对系统稳定性的影响。

因此,针对上述问题,本文推导GFL-GFM混合系统稳定的关键条件,定义表征混合系统稳定性及强弱的关键量,并进一步揭示变流器参数及容量占比对混合系统稳定性的影响。首先,推导混合系统的稳定条件;其次,定义“混合系统支撑量”来表征混合系统的稳定性,进一步推导“改进短路比”来表征混合系统的强弱;然后,对变流器的关键参数进行分析,定量获得变流器的临界容量占比;最后,通过实验验证以上分析的正确性。

本文的结构如下:首先,推导GFL-GFM混合系统的稳定条件;其次,定义并描述“混合系统支撑量”及“改进短路比”;再次,分析变流器参数及其容量占比对混合系统稳定性的影响;然后,对分析结论进行实验验证;最后,对本文进行总结。

1 GFL-GFM 混合系统稳定条件

目前在风电场站或者光伏场站中,商用化的新能源发电机组主要通过跟网型变流器接入电网,并

由同步发电机组提供维持电力系统电压频率稳定的服务，而这会导致运营成本增加、新能源占比降低，违背“双碳”目标的初衷。而若将同步发电机组在新能源场站中的占比逐渐降低，风电场站及光伏场站的电压及频率稳定性将被削弱，同时导致电压频率波动将越来越频繁。因此需要将构网型变流器引入到新能源场站中，构建 GFL-GFM 混合系统，以支撑系统的电压及频率稳定，如图 1 中蓝色框内所示。

对于图 1 所示的混合系统架构，其模块化子系统可简化为图 2 所示的典型架构。图 2 中，跟网型变流器通过 PLL 与电网实现相位同步，而构网型变流器则通过功率同步环与电网进行交互。二者均通过各自线路连接到 PCC 点，并实现并网。在架构图中，各参数含义及参数设定值见表 1。其中： L_M 、 L_L 和 L_G 分别为构网型变流器、跟网型变流器和电网的线路参数，表达为 $L_M = l_M \cdot x_M$ ， $L_L = l_L \cdot x_L$ ， $L_G = l_G \cdot x_G$ ； x_M 、 x_L 和 x_G 为对应电网及变流器距 PCC 点距离； V_{Ldq} 、 V_{Mdq} 及 I_{Ldq} 、 I_{Mdq} 分别为 V_L 、 V_M 及 I_L 、 I_M 经 dq 变换后的值； I_{Ldq}^* 和 V_{Mdq}^* 分别为 I_{Ldq} 和 V_{Mdq} 的参考值。当系统中涉及多台构网型变流器或跟网型变流器时，需先将变流器进行聚合，聚合后的变流器

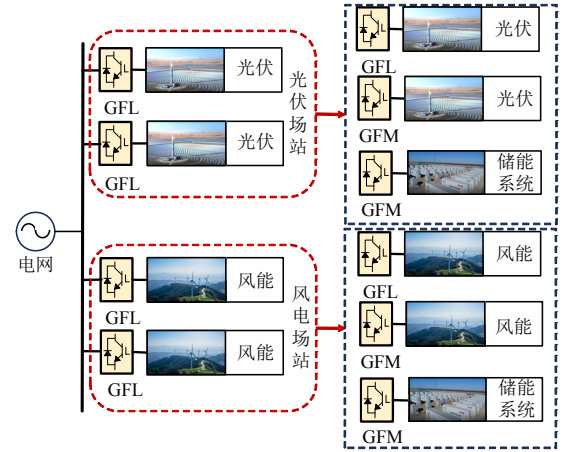


图 1 仅含跟网型变流器的高比例新能源电力系统转变为 GFL-GFM 混合系统
Fig. 1 High proportion new energy power system with only GFL inverters transformed into GFL-GFM hybrid system

控制参数及功率参考值发生变化，但控制策略以及变流器的特性不发生改变^[28]。

根据图 2 中跟网型变流器及构网型变流器的控制框图，可以获得相应的相位角表达式。其中，跟网型变流器的相位角表达式为

$$\theta_L = \frac{1}{s} [K_{pL} \cdot V_{Lq} + K_{iL} \cdot \frac{1}{s} \cdot V_{Lq} + \omega_n] \quad (1)$$

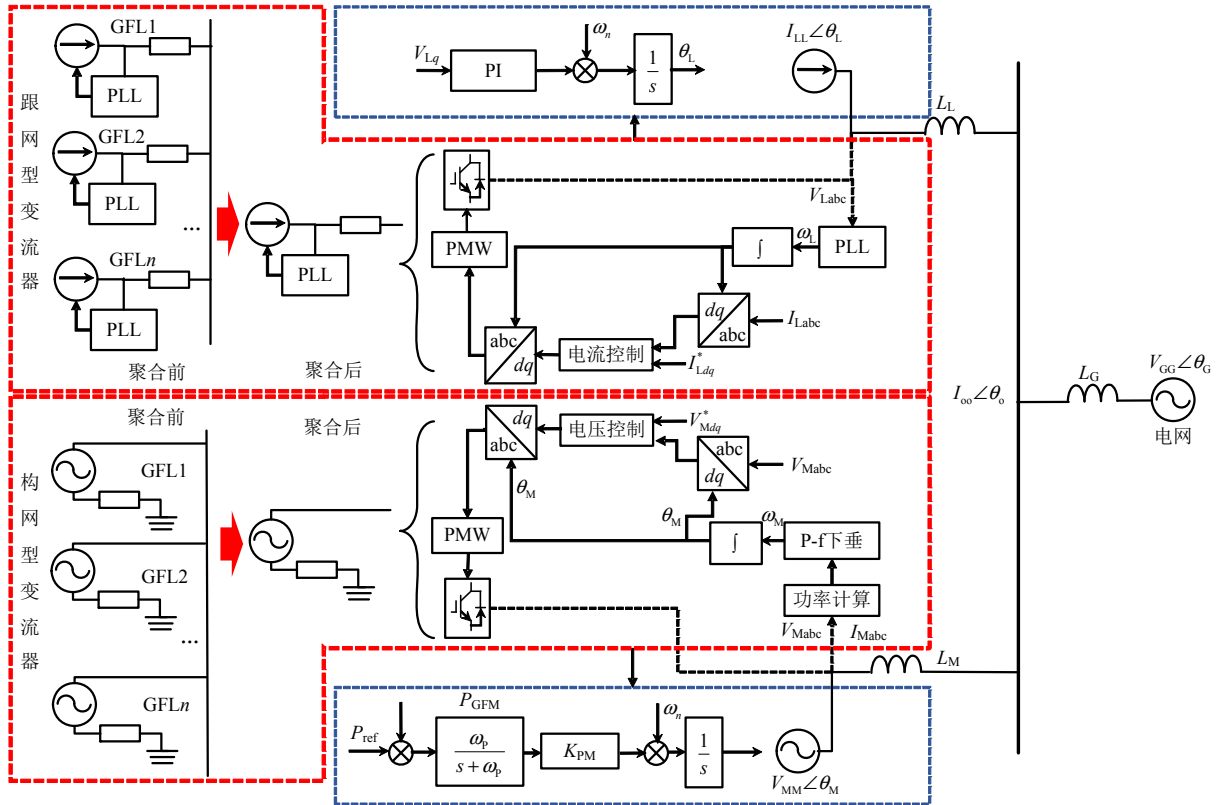


图 2 包含跟网型变流器及构网型变流器的混合电力系统的典型架构

Fig. 2 Typical architecture of hybrid power system with Grid-Following and Grid-Forming inverters

表1 GFL-GFM混合电力系统参数含义及部分参数设定值

Table 1 Basic parameters of GFL-GFM hybrid power system		
参数	参数含义	参数设定值
电气特性参数	V_G	电网电压/V
	V_M	构网型变流器输出端口电压/V
	V_O	PCC 点电压
	V_L	跟网型变流器输出端口电压
	I_G	电网输出电流
	I_M	构网型变流器输出端口电流
线路电感参数	I_L	跟网型变流器输出端口电流/A
	l_G	电网线路电感参数/(H/km)
	l_M	构网型变流器线路电感参数/(H/km)
	l_L	跟网型变流器线路电感参数/(H/km)
控制参数	K_{pL}	PLL 控制的比例系数
	K_{iL}	PLL 控制的积分系数
	K_{pM}	构网型变流器下垂控制系数
其他参数	θ_O	PCC 点的相位角
	θ_G	电网的相位角
	θ_L	跟网型变流器的相位角
	θ_M	构网型变流器的相位角
	ω_L	跟网型变流器的频率
	ω_M	构网型变流器的频率
	x_M	电网距 PCC 点的距离
	x_L	跟网型变流器距 PCC 点距离
	x_G	构网型变流器距 PCC 点距离
	ω_h	系统参考频率/(rad/s)
	ω_p	低通滤波器截止频率/(rad/s)
	P_{ref}	构网型变流器参考输出功率/kW
	P_{GFM}	构网型变流器实际输出功率

同理, 构网型变流器的相位角表达式为

$$\theta_M = \frac{1}{s} \cdot [K_{pM} \cdot \frac{\omega_p}{s + \omega_p} \cdot (P_{ref} - P_{GFM}) + \omega_n] \quad (2)$$

以 PCC 点的相角为参考相角, 则构网型变流器和跟网型变流器的参考相角 δ_M 与 δ_L 的表达式为

$$\begin{cases} \delta_L = \theta_L - \theta_O \\ \delta_M = \theta_M - \theta_O \end{cases} \quad (3)$$

根据基尔霍夫电压电流定律, 最终可以得到关于跟网型变流器及构网型变流器的动力学表达式:

$$\begin{cases} \ddot{\delta}_L + (a_{L1} \cos \delta_L + a_{L2}) \dot{\delta}_L + a_{L3} \cos(\delta_M - \delta_L)(\dot{\delta}_M - \dot{\delta}_L) + \frac{a_{L1}}{k} \sin \delta_L + \frac{a_{L3}}{k} \sin(\delta_M - \delta_L) = -a_{L2} \omega_n \\ \ddot{\delta}_M + \omega_p \dot{\delta}_M + a_{M1} \sin \delta_M + a_{M2} \cos(\delta_M - \delta_L - \Delta\theta) = a_{M3} \end{cases} \quad (4)$$

具体推导过程及对应参数表达式见附录 A。

对 GFL-GFM 混合系统来说, 平衡点的存在是系统稳定的前提和必要条件, 因此需要构建系统平

衡点计算公式, 并进一步分析其存在条件, 相应的平衡点方程及存在条件推导见附录 B。对于在大扰动后平衡点不存在的情况, 系统必然失稳, 没有分析的意义。因此在本文后续研究中, 仅分析在大扰动后平衡点依然存在的情况。

对于式(4)所构建的非线性系统, 采用幅值映射法(amplitude mapping mode, AMM)对稳定条件进行分析^[14]。在 AMM 中, 幅值表达式用来表示系统振荡幅值, 频率表达式用来表示系统振荡频率, 而振荡频率不会影响系统的稳定性, 因此可以仅用幅值表达式对稳定性进行分析, 具体分析过程见附录 B, 最终经过化简后获得系统的稳定条件为

$$\underbrace{B_G V_{Gd0} (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_L^2)}_{\text{电网}} + \underbrace{B_M V_{Md0} (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_L^2 - \frac{1}{4} \Delta \delta_M^2)}_{\text{构网型变流器}} - \underbrace{(L_L I_{Ld0})/K}_{\text{跟网型变流器}} > 0 \quad (5)$$

式中: $K = K_{pL}/K_{iL}$ 为跟网型变流器 PLL 控制中的比例系数以及积分系数的比值; $\Delta \delta_L$ 及 $\Delta \delta_M$ 分别为跟网型变流器及构网型变流器扰动前后平衡点的变化; B_G 及 B_M 表达式见附录式(A3)。混合系统在受到扰动后, 其平衡点会发生变化, 所受的扰动越大, 其平衡点的变化也越大。因此可以用 $\Delta \delta_L$ 及 $\Delta \delta_M$ 表示跟网型变流器及构网型变流器所受的扰动大小。

2 GFL-GFM 混合系统的混合系统支撑量及改进短路比

2.1 混合系统支撑量

从系统的稳定条件可以看出, 系统的稳定受电网、构网型变流器及跟网型变流器 3 部分影响, 并且电网及变流器的电气特性参数、线路参数、控制参数及扰动水平相互耦合相互关联, 共同作用, 最终影响了系统的稳定性。在系统稳定条件的表达式(5)中, B_G 、 B_M 及系统的扰动 $\Delta \delta_L$ 、 $\Delta \delta_M$ 均为无量纲系数, 因此电网及构网型变流器部分的量纲为伏特(V), 这也反映出构网型变流器输出外特性为电压源。而对于跟网型变流器部分, 控制参数为无量纲系数, 并通过电流与电感的乘积, 得到与电网及构网型变流器部分相同的量纲伏特(V), 这也反映了跟网型变流器输出外特性为电流源, 并且通过线路参数, 在 PCC 点以电压形式呈现。从整个混合系统来看, 构网型变流器和电网对混合系统起到了支撑作用, 其在 PCC 点的电压用来支撑跟网型变流器输出电流对 PCC 点的作用。因此, 本文以电压支撑为分

析角度，定义混合系统支撑量 F_{VS} ：

$$F_{VS} = B_G V_{Gd0} (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_L^2) + B_M V_{Md0} (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_L^2 - \frac{1}{4} \Delta \delta_M^2) - \frac{L_L I_{Ld0}}{K} \quad (6)$$

混合系统支撑量用来表示维持混合系统运行的支撑能力，从式(6)可以看出，混合系统支撑量的表达式中存在系统所受扰动量，并且由于系统所受的扰动是变化量，系统的混合系统支撑量会随之变化，因此混合系统支撑量也为变量，用来评估系统受到扰动后能否维持稳定。

对于一个混合系统，扰动越大，系统越容易失稳。针对所提 GFL-GFM 混合系统，当跟网型变流器以及构网型变流器所受扰动外为变量，其余参数与表 1 中所设定参数相同时，式(6)量化了系统所受扰动与系统稳定性的关系，并绘制了在不同扰动下混合系统支撑量的等高线图，如图 3 所示。其中白线表示为当混合系统的电气特性参数、线路电感参数以及控制参数不变时，当 $F_{VS}=0$ 时，跟网型变流器及构网型变流器所受扰动，即临界混合系统支撑量下，跟网型变流器及构网型变流器所受扰动。当跟网型及构网型变流器所受扰动在白线以内时，混合系统在扰动后会恢复稳定。

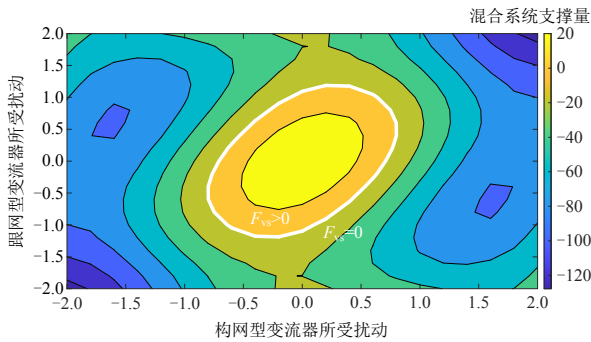


图 3 跟网型及构网型变流器

在不同扰动下混合系统支撑量的等高线图

Fig. 3 Contour plots of Hybrid system support capacity for grid-following and grid-forming inverters under different disturbances

图 3 中，白线为混合系统支撑量的临界线，当混合系统所受扰动在白线以外，混合系统的混合系统支撑量小于 0，混合系统将在对应的扰动下振荡失稳，在白线区域内时，混合系统支撑量大于 0，混合系统将在该扰动下恢复稳定。

2.2 混合系统支撑量的另一种形式——短路比表达

重新对式(5)进行整理，化简后表达式为

$$\frac{V_{Gd0}^2}{I_L \cdot V_{Gd0}} \cdot \frac{KL_M}{L_M L_G + L_L L_M + L_L L_G} (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_L^2) + \frac{V_{Md0}^2}{I_L \cdot V_{Md0}} \cdot \frac{KL_G}{L_M L_G + L_L L_M + L_L L_G} (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_L^2 - \frac{1}{4} \Delta \delta_M^2) > 1 \quad (7)$$

进一步对式(7)中的参数进行分析。对于一个混合系统，其跟网型变流器的控制参数 K 以及电网电感 L_G 、 L_M 、 L_L 均为定值。电网及构网型变流器用以维持 PCC 点的电压稳定，因此在混合系统中， V_{Gd0} 和 V_{Md0} 可以近似表达为 V_O 。而对于跟网型变流器输出的电流 I_L ，其会随着新能源发电机组的发电量发生变化，但新能源发电机组存在最大输出功率，即存在一个跟网型变流器做大输出电流 I_{LMAX} 。对于跟网型变流器及构网型变流器所受的扰动 $\Delta \delta_L$ 以及 $\Delta \delta_M$ ，主要是由于电网的离并网、构网型变流器的投切以及跟网型变流器输出电流变化所引起的，在满足平衡点存在的前提下，如果所受的扰动为定值 $\Delta \delta_{LCONST}$ 以及 $\Delta \delta_{MCONST}$ 式(7)可以进一步化简。

$$\underbrace{\frac{V_O^2}{I_{LMAX} \cdot V_O} \cdot \frac{KL_M (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{LCONST}^2 / 4)}{L_M L_G + L_L L_M + L_L L_G}}_{\text{电网}} + \underbrace{\frac{V_O^2}{I_{LMAX} \cdot V_O} \cdot \frac{KL_G (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{LCONST}^2 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{MCONST}^2)}{L_M L_G + L_L L_M + L_L L_G}}_{\text{构网型变流器}} > 1 \quad (8)$$

可进一步对式(8)进行化简：

$$\underbrace{\frac{V_O^2}{P_{iL}} \cdot \frac{K}{\omega Z_{iG}} (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{LCONST}^2)}_{\text{电网}} + \underbrace{\frac{V_O^2}{P_{iL}} \cdot \frac{K}{\omega Z_{iM}} (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{LCONST}^2 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{MCONST}^2)}_{\text{构网型变流器}} > 1 \quad (9)$$

其中，参数 P_{iL} 、 Z_{iG} 和 Z_{iM} 的表达式为

$$\begin{cases} P_{iL} = I_{LMAX} \cdot V_O \\ Z_{iG} = \frac{X_M X_G + X_L X_M + X_L X_G}{X_M} \\ Z_{iM} = \frac{X_M X_G + X_L X_M + X_L X_G}{X_G} \end{cases} \quad (10)$$

式(9)的表达形式类似于传统电力系统短路比 (short circuit ratio, SCR) 的表达式：

$$S_{CRi} = \frac{S_i}{P_i} = \frac{|V_i|^2}{P_i} \cdot \frac{1}{Z_i} \quad (11)$$

式中： S_i 为系统在总线 i 处的短路容量； P_i 为可再

生能源的注入功率; V_i 为总线 i 处的电压幅值; Z_i 为总线 i 处的戴维南等效阻抗的大小。对于传统电力系统, 电网为电力系统提供支撑, 因此可以使用传统短路比对电力系统强弱进行衡量量化。然而对于电力电子化的多机电力系统, 由于构网型变流器也对系统的强弱起到了作用, 因此无法直接使用传统短路比的概念对系统强弱进行评估^[23]。而在式(9)中, 其表达形式同时包含电网以及构网型变流器两个部分, 并且表达形式均与传统短路比类似, 因此, 也可以将式(9)定义为改进短路比(improve short-circuit ratio, ISCR)。

$$I_{SCR} = \frac{V_O^2}{P_{iL}} \cdot \frac{K}{\omega Z_{iG}} \left(1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{LMAX}^2\right) + \frac{V_O^2}{P_{iL}} \cdot \frac{K}{\omega Z_{iM}} \left(1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{LMAX}^2 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{MMAX}^2\right) \quad (12)$$

从式(12)可以看到, 改进短路比与传统短路比有相似的表达形式, 其与混合系统支撑量的关系为

$$I_{SCR} = \frac{K}{L_L I_{LMAX}} F_{vsCONST} + 1 \quad (13)$$

式中 $F_{vsCONST}$ 为在固定扰动下混合系统的支撑量。因此, 改进短路比与混合系统支撑量等价, 改进短路比是对固定容量、固定扰动的混合系统的评估, 是混合系统支撑量的另外一种形式。并且当混合系统的改进短路比大于 1 时, 混合系统在所设固定扰动下稳定, 且改进短路比越大, 系统越稳定。但是与传统短路比不同的是, 其由电网以及构网型变流器相加构成, 更好地反应了电力电子化电力系统中构网型变流器的作用与影响。此外, 其表达式中还存在控制参数以及所设定的最大扰动量, 能够更好地反应电力电子化的电力系统的特点。此外, 改进短路比中可再生能源的注入功率是由跟网型变流器输出电流决定, 这是由于在混合系统中, 跟网型变流器主要提供输出功率, 而构网型变流器以及电网的主要功能为支撑系统的电压及频率稳定性^[8]。

对于一个混合系统, 跟网型变流器控制参数 K 越大, 其对应的改进短路比越大, 同样, 跟网型变流器所受最大扰动越小, 混合系统对应的改进短路比越大。式(12)量化了跟网型变流器控制参数以及不同固定扰动对系统改进短路比的影响, 并绘制了对应的等高线图, 如图 4 所示。

在图 4 中, 白线为改进短路比的临界线, 当跟网型变流器的控制参数以及所受最大扰动在白线右侧时, 混合系统改进短路比大于 1, 系统稳定;

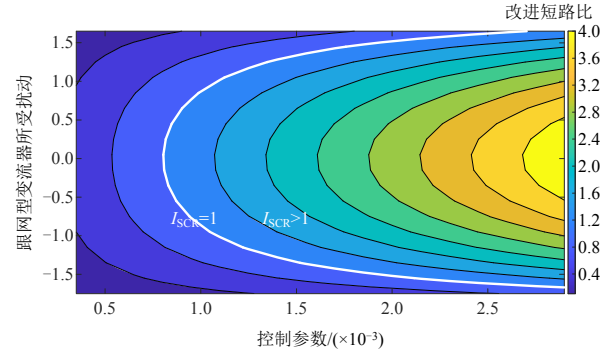


图 4 跟网型变流器的不同控制参数及所受最大扰动对改进短路比影响的等高线图

Fig. 4 Contour plot of the influence of different control parameters and maximum disturbance on the static short-circuit ratio of grid-following inverter

在白线左侧时, 混合系统改进短路比小于 1, 系统失稳。

3 构网型变流器和跟网型变流器对系统稳定性影响分析

3.1 构网型变流器对系统稳定性影响分析

当混合系统中没有构网型变流器时, 即 $L_M = \infty$, 因此 $B_G = L_L / (L_L + L_G)$, $B_M = 0$, 此时混合系统支撑量的表达式可以简化为

$$F_{vSL} = B_G V_{Gd0} \left(1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_L^2\right) - \frac{L_L I_{Ld0}}{K} \quad (14)$$

与 GFL-GFM 混合系统的混合系统支撑量相比, 在系统受到相同扰动时, $F_{VS} > F_{VSL}$, 即仅含跟网型变流器的系统会更容易面临失稳的状况, 需要减少跟网型变流器的输出电流, 即降低 I_{Ld0} 来维持系统稳定。因此, 将构网型变流器引入仅含跟网型变流器的系统中, 对系统的稳定性起到积极意义, 构网型变流器对跟网型变流器输出电流的影响如图 5 所示。

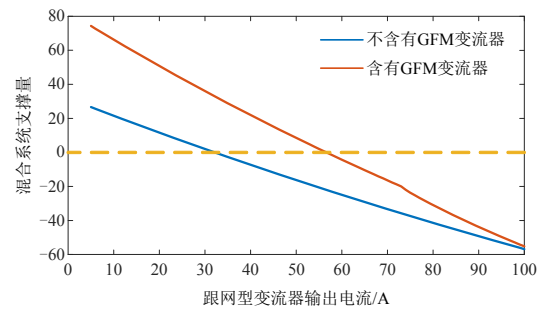


图 5 构网型变流器对混合系统支撑量的影响

Fig. 5 Effect of grid-forming inverter on hybrid system support capacity

从图 5 可以看出, 相比于仅含跟网型变流器的电力系统, 当混合系统含有构网型变流器时, 可

以允许跟网型变流器的输出功率更高，即允许更大规模的跟网型变流器的接入。并且在跟网型变流器输出相同电流时，混合系统支撑量比仅含跟网型变流器的电力系统更高，因此系统更稳定。

当系统中没有电网时，即 $L_G=\infty$ ，因此 $B_M=L_L/(L_L+L_M)$ ， $B_G=0$ ，对应的混合系统支撑量表达式为

$$F_{VSLM} = B_M V_{M0} (1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_L^2 - \frac{1}{4} \Delta \delta_M^2) - \frac{L_L I_{Ld0}}{K} \quad (15)$$

可以看出，当电网、构网型变流器及跟网型变流器的电气特性参数不变时， $F_{VSL} > F_{VSLM}$ ，即构网型变流器对系统的支撑能力弱于电网。这是由于构网型变流器在混合系统支撑量及改进短路比的表达式中均存在扰动 $\Delta \delta_M$ ，而电网的相角为基准相角，不会因系统的扰动而发生变化。

从电网及变流器的电感计算公式可知，电网及变流器距 PCC 点的距离影响了其对应的线路参数，从而进一步影响系统的稳定性。电网及变流器到 PCC 点的不同距离也可以反映出其对混合系统作用的强弱，电网及变流器距 PCC 点的距离越近，其对混合系统的影响越强；反之，则对混合系统的影响越弱。因此，可以从电网及变流器到 PCC 点的距离来反映其对混合系统影响的强弱。

图 6 中白线为混合系统支撑量的临界曲线，左侧为 $F_{VS} > 0$ ，右侧为 $F_{VS} < 0$ ，从图 6 可以看出，电网及构网型变流器的线路参数与混合系统支撑量的大小呈负相关，电网及构网型变流器到 PCC 点的距离越近，混合系统的支撑力越大。由于临界线 $F_{VS}=0$ 为一个凹曲线，因此也可以看出，当电网距离 PCC 点足够近时，构网型变流器可以在距离 PCC 点较远处依旧能维持系统的稳定性；反之，则不行。因此，电网对系统稳定的支撑能力要强于构网型

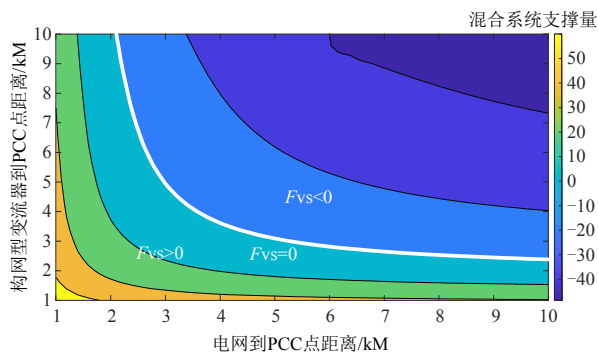


图 6 构网型变流器及电网到 PCC 点距离对混合系统支撑量的影响

Fig. 6 Influence of distance from grid-forming inverter and grid to PCC point on hybrid system support capacity

变流器。

综上，构网型变流器的加入使得混合系统支撑量及改进短路比的表达式中都增加了一个系数为正的多项式，虽然其支撑力要弱于电网，但是依然可以起到对 GFL-GFM 混合系统的正向支撑作用，可以使混合系统更加稳定。

3.2 跟网型变流器对系统稳定性影响分析

从混合系统支撑量的表达式中可以直观看出，跟网型变流器对混合系统起到了负作用，即电网及构网型变流器所提供的支撑主要为了维持跟网型变流器的正常运行；当电网及构网型变流器所提供的支撑力不足时，系统将会失稳。图 7 为 GFL-GFM 混合系统中，跟网型变流器的电气特性参数及所受扰动对系统稳定性的影响。

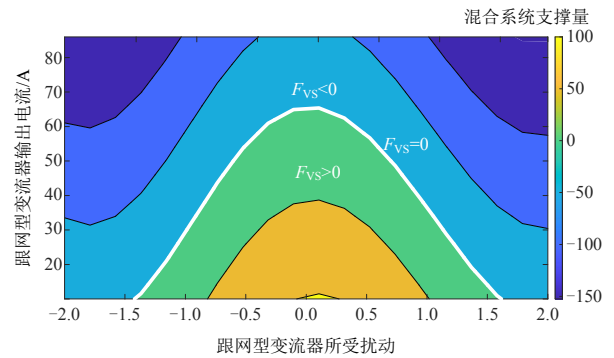


图 7 跟网型变流器所受扰动及输出电流对混合系统支撑量的影响

Fig. 7 Effects of disturbance and output current on hybrid system support capacity of grid-following inverter

图 7 中白线为混合系统支撑量临界曲线，白线范围内侧为 $F_{VS} > 0$ ，外侧为 $F_{VS} < 0$ ，随着跟网型变流器输出电流逐渐增加，系统将由稳定逐步变为失稳。同样，跟网型变流器所受的扰动越大，系统的稳定性越低。此外，跟网型变流器稳定性与其所受扰动正负无关，并且在扰动为 0 时，如果跟网型变流器输出电流过大，系统依然会振荡失稳。

从式(6)可以看出，跟网型变流器对系统稳定性的影响也与 PLL 控制参数及线路参数相关，如图 8 所示。

图 8 中白线为混合系统支撑量的临界曲线，白线范围下侧为 $F_{VS} > 0$ ，上侧为 $F_{VS} < 0$ 。从图 8 可以看出，随着跟网型变流器距 PCC 点的距离不断增大，系统的稳定性在不断降低。而 PLL 控制参数 K 与系统的稳定性呈正相关，其中 $K=K_{PL}/K_{IL}$ ，因此也可以通过适当增加 PLL 中的 K_{PL} ，降低 PLL 中的 K_{IL} 以增加系统稳定性。

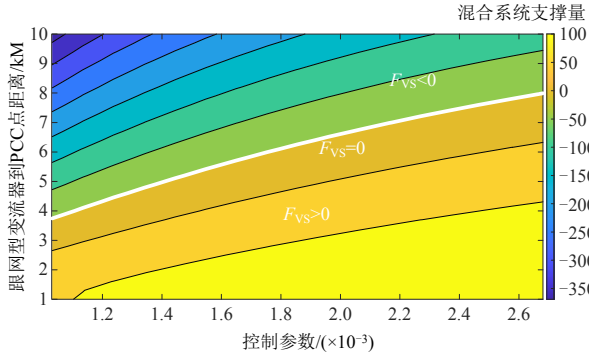


图8 跟网型变流器到PCC点距离与其控制参数对混合系统支撑量的影响

Fig. 8 Influence of the distance from the grid-forming inverter to the PCC point and its control parameters on the hybrid system support capacity

3.3 跟网型变流器输出容量占比对系统稳定性影响分析

在一个稳定运行的 GFL-GFM 混合系统中，构网型变流器输出容量 P_{GFM} 为

$$P_{\text{GFM}} = \frac{3}{2} \left[\frac{1}{\omega(L_M + L_G)} V_O^2 \sin \delta_{M0} - \frac{L_G}{L_M + L_G} V_O I_L \cos(\delta_{M0} - \delta_{L0} - \Delta\theta) \right] \quad (16)$$

式中 δ_{L0} 和 δ_{M0} 为系统的平衡点，可由附录式(B1)计算得出。对于跟网型变流器，其最大输出容量表达式为

$$P_{\text{GFL}} = I_{\text{LMAX}} \cdot V_O \quad (17)$$

其与 P_{IL} 有相同的表达形式，设跟网型变流器输出容量占比为 η ，其表达式为

$$\eta = \frac{P_{\text{GFL}}}{P_{\text{GFL}} + P_{\text{GFM}}} \quad (18)$$

由式(18)可以获得改进短路比与跟网型变流器输出容量占比 η 的表达式为

$$I_{\text{SCR}} = \frac{(1-\eta)V_O^2}{\eta P_{\text{GFM}}} \cdot \frac{K}{\omega Z_{\text{IG}}} \left(1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{\text{LCONST}}^2 \right) + \frac{(1-\eta)V_O^2}{\eta P_{\text{GFM}}} \cdot \frac{K}{\omega Z_{\text{IM}}} \left(1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{\text{LCONST}}^2 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{\text{MCONST}}^2 \right) \quad (19)$$

根据式(15)，对式(19)进一步化简，可得：

$$I_{\text{SCR}} = \rho \cdot \frac{K}{\omega Z_{\text{IG}}} \left(1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{\text{LCONST}}^2 \right) + \rho \cdot \frac{K}{\omega Z_{\text{IM}}} \left(1 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{\text{LCONST}}^2 - \frac{1}{4} \Delta \delta_{\text{MCONST}}^2 \right) \quad (20)$$

其中 ρ 的表达式为

$$\rho = \frac{2(1-\eta)(X_M + X_G) + 3\eta X_G \cos(\delta_{M0} - \delta_{L0} - \Delta\theta)}{3\eta \sin \delta_{M0}} \quad (21)$$

从式(20)及(21)可以看出，影响改进短路比的关键量为线路参数以及跟网型变流器的输出容量。其中线路参数主要由电网及变流器与 PCC 点距离决定。然而在一个确定的 GFL-GFM 混合系统中，变流器距 PCC 点的距离一般不变，电网距 PCC 点距离对混合系统的稳定性起到了关键作用。因此，在电网到 PCC 点不同距离下，跟网型变流器容量占比与改进短路比的关系如图 9 所示。

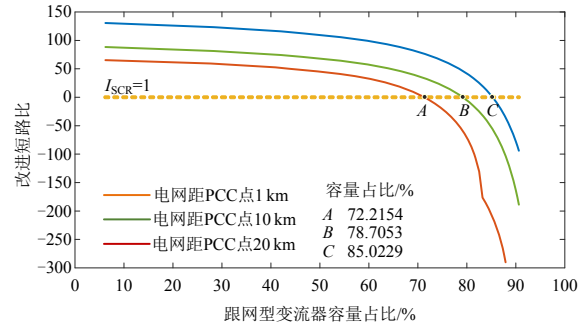


图9 电网距PCC点的距离对混合系统中跟网型变流器输出容量占比的影响

Fig. 9 Influence of the distance between the power grid and the PCC point on the proportion of output capacity of grid following inverters in hybrid systems

图 9 中 A、B、C 3 点代表了在电网到 PCC 点不同距离下，跟网型变流器临界容量占比。其中 A 点表示当电网距 PCC 点 20 km 时，跟网型变流器临界容量占比为 72.2154%，B 点表示当电网距 PCC 点 10 km 时，跟网型变流器临界容量占比为 78.7053%，C 点表示当电网距 PCC 点 10 km 时，跟网型变流器临界容量占比为 85.0229%。当跟网型变流器容量占比小于临界占比时，混合系统稳定。此外，由临界容量占比的比值可以看出，电网到 PCC 点的距离越近，跟网型变流器临界容量占比越大。这也从侧面表明，电网强度越高，所能支撑的跟网型变流器输出功率也越大。进一步，对仅含构网型变流器及跟网型变流器的混合系统稳定性进行分析，其与含有构网型变流器时跟网型变流器输出功率占比与改进短路比进行的对比如图 10 所示。

图 10 中，A、B 分别为仅含变流器的混合系统的临界容量占比和含有电网的混合系统的临界容量占比。从图 10 可以看到，仅含变流器的混合系统的临界容量占比 A 要小于 B，这也反映出电网为混合系统提供了稳定支撑。

在本节的分析中，采用了控制变量法，即在对

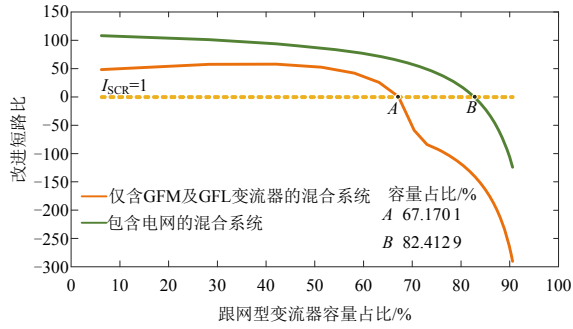


图 10 仅含 GFM 及 GFL 变流器的混合系统和包含电网的混合系统中跟网型变流器输出容量占比对改进短路比的影响

Fig. 10 Influence of the proportion of output capacity of grid following inverters on the static short-circuit ratio in hybrid systems containing only GFM and GFL converters and hybrid systems containing power grids

一个或两个数据变量进行分析时，将其他变量设定为表 1 中的参考值，以便精确测量该变量的独立效应。这种方法能够减少外部因素的干扰，提高分析结果的可靠性和准确性。当涉及多数据变量时，分析过程将更加复杂，需要采用系统化的方法进行综合评估，可以选择一个基准变量，并保持其他变量在其参考值，以观察其单独变化的效果。接着，可以逐步引入其他变量，通过多次实验和数据收集，分析变量之间的相互作用。

4 算例分析

本节使用 MATLAB/Simulink 平台构建 GFL-GFM 混合系统模型，其拓扑结构如图 2 所示，参数信息如表 1 所示。

4.1 混合系统支撑量验证

将跟网型变流器输出电流的变化作为系统的扰动，通过模拟大负荷启动或多个负荷同时接入、日常负载波动或逐步增加负载、以及负荷减少或部分负荷断开的情景，观察 PCC 点的频率波动及相应的混合系统支撑量大小。

从图 11(a)可以看出，0.25 s 时，跟网型变流器输出电流由 100 A 上升至 180 A，相对应的混合系统支撑量由 8.24 下降到 -6.56，系统失稳，PCC 点的频率波动逐步增大。从图 11(b)中可以看出，在 0.25 s 时，跟网型变流器输出电流由 100 A 上升至 120 A，相对应的混合系统支撑量由 8.24 下降到 1.9，混合系统支撑量大于 0，系统仍维持稳定，PCC 点的频率波动逐步降低。从图 11(c)可以看出，在 0.25 s 时，跟网型变流器输出电流由 100 A 下降至 80 A，

相对应的混合系统支撑量由 8.24 上升到 10.18，系统迅速稳定，PCC 点的频率振荡幅值较低。通过对比图 11(a)与图 11(b)、(c)可以得出，当混合系统支撑量小于 0 时，系统失稳。对比图 11(b)、(c)可以得出，混合系统的混合系统支撑量越大，PCC 点频率振荡幅值越小，越快恢复稳定。从图 11 也可看出，混合系统支撑量随着所受扰动变化而变化，因此可以用混合系统支撑量表示系统某一时刻的稳定性。

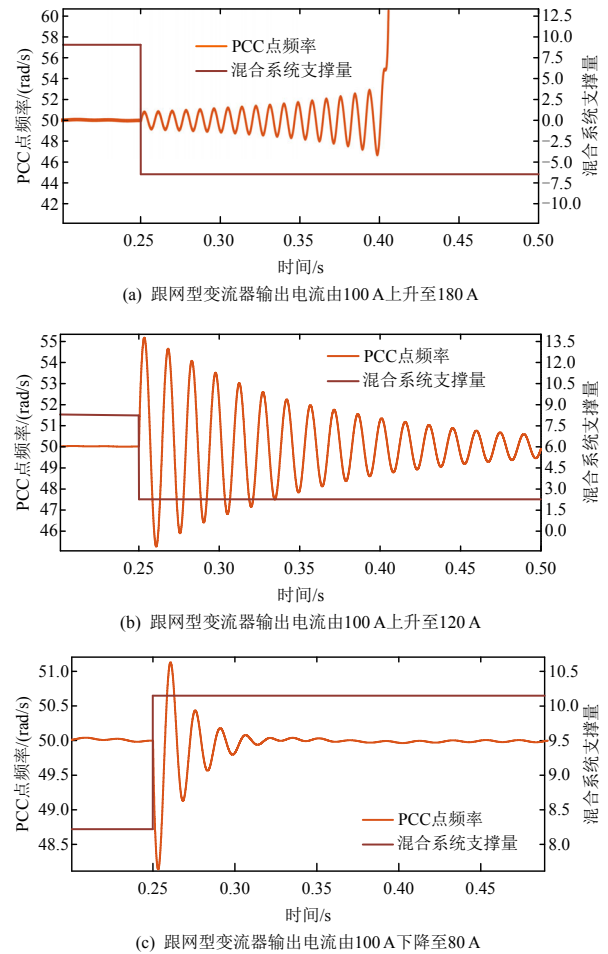


图 11 跟网型变流器输出电流变化对 PCC 点频率及混合系统支撑量影响

Fig. 11 Effect of output current of grid-following inverter on PCC point frequency and hybrid system support capacity

4.2 改进短路比验证

对于具有不同改进短路比的混合系统，当面对相同扰动时，其对应的 PCC 点的频率变化如图 12 所示。

从图 12 可以看出，当跟网型变流器输出电流在 0.25 s 时由 100 A 增大到 150 A 时，混合系统的改进短路比越大，PCC 点频率振荡幅值越低，系统越稳定。当静态短路比小于 1 时，系统在受到扰动

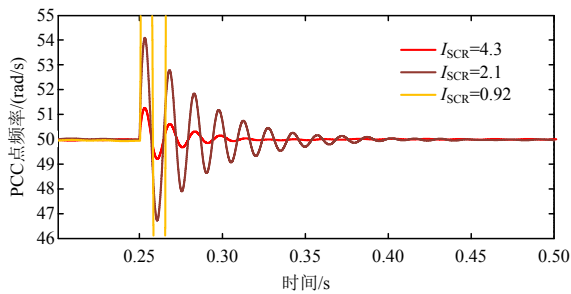


图12 不同改进短路比的 GFL-GFM 混合系统
在相同扰动下 PCC 点频率变化

Fig. 12 Frequency variation of PCC points in GFL-GFM hybrid systems with different static short-circuit ratios under the same disturbance

后会失稳。因此,可以通过静态短路比来评估混合系统的稳定性,静态短路比越大,混合系统越稳定。

4.3 构网型变流器对系统稳定性的影响

仅含跟网型变流器的电力系统和 GFL-GFM 混合系统在面对相同扰动时, PCC 点的频率变化如图 13 所示。

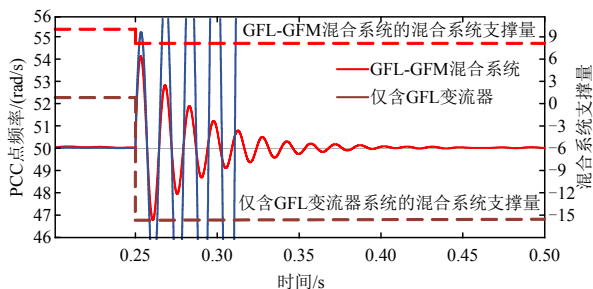


图13 构网型变流器对混合系统频率影响

Fig. 13 Effect of grid-forming inverter on frequency of GFL-GFM hybrid system

在 0.25 s 时,跟网型变流器输出电流由 80 A 增加至 100 A,对于仅含跟网型变流器的电力系统而言,混合系统支撑量将下降至-15.4,系统将振荡失稳。而对于 GFL-GFM 混合系统,系统支撑力虽然下降至 8.24,但其仍大于 0,系统将在 0.4 s 时重新恢复稳定。由图 13 可知,构网型变流器对混合系统的稳定性起着积极的作用。

4.4 跟网型变流器对系统稳定性的影响

当跟网型变流器的控制参数发生变化时,其对应的 PCC 点频率波动如图 14 所示。

0.5 s 时,跟网型变流器输出电流由 100 A 增加至 150 A,从图 14 可以看到,跟网型变流器控制参数越大,系统的混合系统支撑量越大,面对扰动时, PCC 点的频率振幅越小,越快恢复稳定。如果控制参数过小,则会出现混合系统支撑量小于 0 的情况,混合系统失稳。

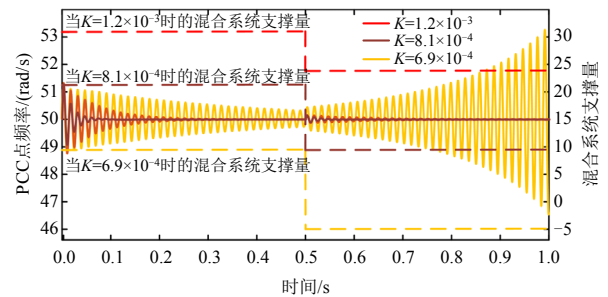


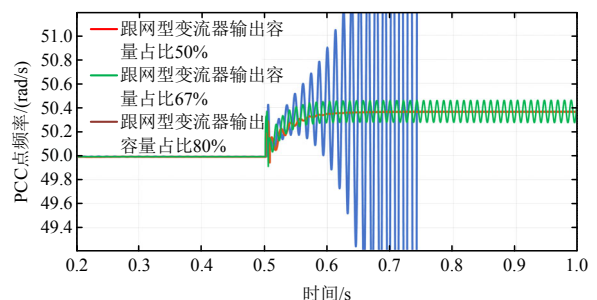
图14 不同跟网型变流器控制参数
对 PCC 点频率以及混合系统支撑量的影响

Fig. 14 Influence of different control parameters of grid-following inverters on PCC point frequency and hybrid system support capacity

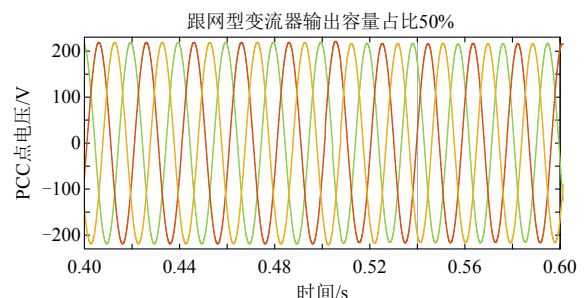
4.5 跟网型变流器容量占比对系统稳定性的影响

对于 GFL-GFM 混合系统,当电网在 0.5 s 断开,不同跟网变流器输出容量占比系统的 PCC 点频率波动如图 15 所示。

图 15(a)中,红线表示跟网型变流器容量占比 50% 的混合系统,绿线表示跟网型变流器容量占比 67% 的临界占比系统,蓝线表示跟网型变流器容量占比 80% 的系统,从图 15(a)可以看出,跟网型容量占比越高,其面对扰动,频率波动越大,并且当跟网型变流器容量为临界占比时, PCC 点频率处于临界稳定状态。由于构网型变流器使用的是下垂控制方式,因此 PCC 点频率存在静态误差。此外,从不同跟网型变流器输出容量占比对 PCC 点电压、电流影响中也可以看出,处于跟网型变流器输出容量临界占比的系统面对扰动时,可以维持系统电压电流稳定,然而当跟网型变流器输出容量占比过高,面对扰动时,混合系统的电压电流会随之失稳。



(a) 不同跟网型变流器输出容量占比对 PCC 点频率影响



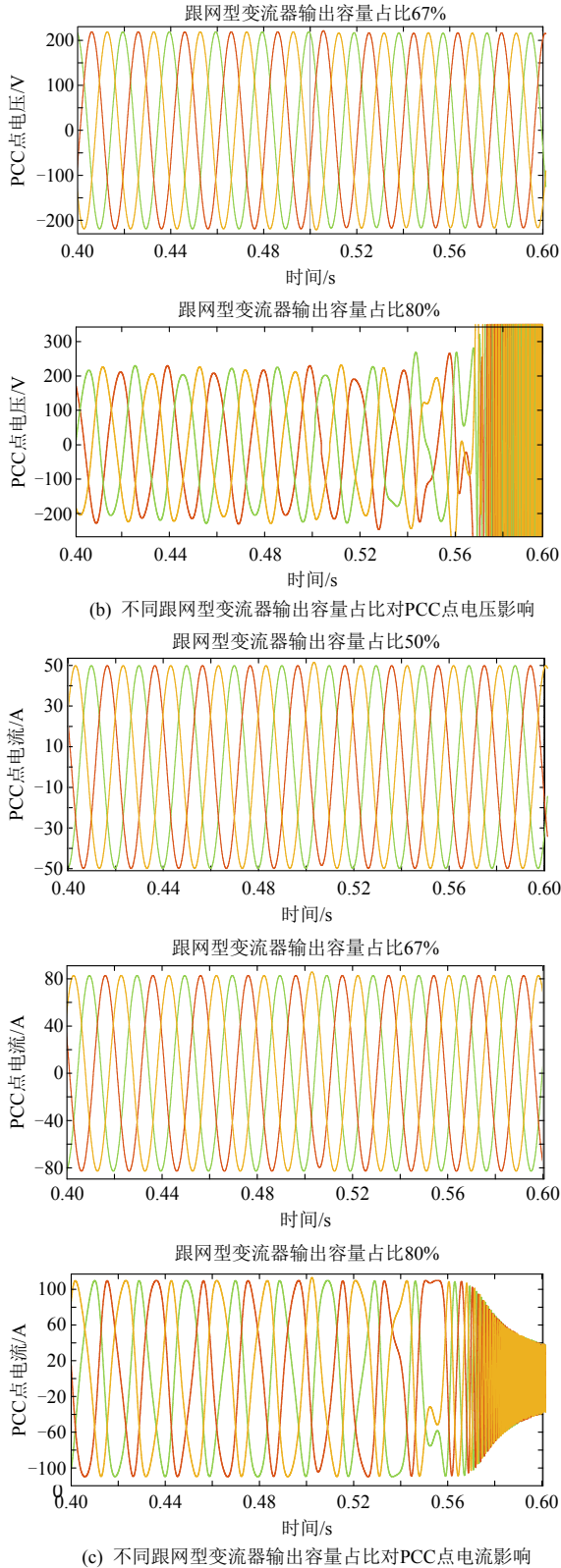


图 15 不同跟网型变流器容量占比对 PCC 点频率、电压及电流影响

Fig. 15 Influence of different capacity ratios of grid following inverters on PCC point frequency, voltage, and current

4.6 仿真实验

使用 RT-LAB 仿真实验平台，对构网型变流器

对混合系统的影响进行仿真验证。在 2.5 s 时，跟网型变流器的输出电流增大，对于含有构网型变流器的混合系统以及不包含构网型变流器的混合电力系统，其对应 PCC 点频率振荡情况如图 16 所示。

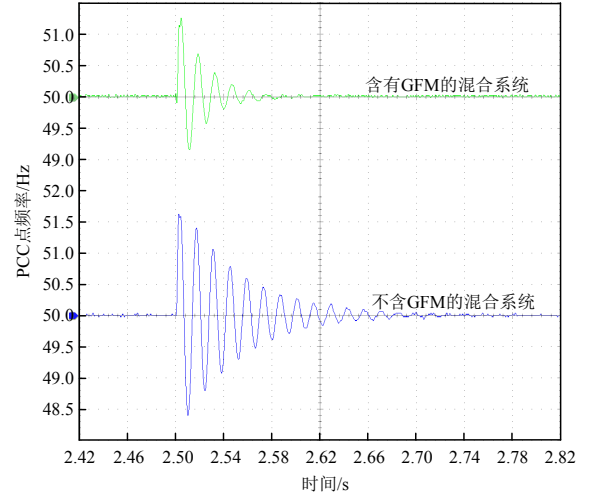


图 16 构网型变流器对混合系统 PCC 点频率影响

Fig. 15 Influence of GFM on the frequency of PCC points in hybrid systems

从图 16 可以看出，当混合系统中包含构网型变流器，PCC 点频率振幅更小，并且更快地趋于稳定，因此构网型变流器在混合系统中，起到了稳定支撑的作用。

5 结论

本文的主要创新点在于推导了 GFL-GFM 混合系统稳定的关键条件，定义了表征混合系统稳定性及强弱的关键量，并揭示了变流器参数及容量配比对混合系统稳定性的影响。通过本文的研究，最终得出以下 3 个关键结论：

1) 提出“混合系统支撑量”这一变量来评估 GFL-GFM 混合系统在受扰动后的稳定性。该量与电网、电力电子变流器的电气特性参数、线路参数、控制参数及扰动水平有关。当混合系统支撑量大于 0 时，系统受扰后会恢复稳定；反之，系统会振荡失稳。

2) 提出并证明“改进短路比”这一新的表征量，更好地评估了 GFL-GFM 混合系统的强弱。与传统短路比不同，该量引入控制参数和固定扰动量，更能体现变流器对电力系统强弱的影响。改进短路比越大，系统越强；当改进短路比小于 1 时，系统不稳定。因此，在实际工程中，应合理设计系统参数，确保改进短路比大于 1。

3) 分析跟网型变流器容量占比对混合系统稳

定性的影响。在本文设定的参数下,跟网型变流器容量最多为构网型变流器容量的2倍,以维持混合系统在扰动下的稳定性。在不同的实际工程中,应根据具体参数,计算适当的变流器容量占比,以维持系统的稳定性。

以上结论通过实验验证了分析的正确性,为高比例新能源电力系统的稳定运行提供了理论基础和实践指导。

参考文献

- [1] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等.碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(S1):28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51(in Chinese).
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14(in Chinese).
- [3] 詹长江,吴恒,王雄飞,等.构网型变流器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(6):2339-2358.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358(in Chinese).
- [4] LI Yitong, GU Yunjie, GREEN T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: a duality theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4541-4554.
- [5] HUANG Liang, WU Chao, ZHOU Dao, et al. A double-PLLs-based impedance reshaping method for extending stability range of grid-following inverter under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4091-4104.
- [6] ZAREI S F, MOKHTARI H, GHASEMI M A, et al. Control of grid-following inverters under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 184-192.
- [7] GAO Xian, ZHOU Dao, ANVARI-MOGHADDAM A, et al. Stability analysis of grid-following and grid-forming converters based on state-space model[C]//2022 International Power Electronics Conference(IPEC-Himeji 2022-ECCE Asia). Himeji, Japan: IEEE, 2022: 422-428.
- [8] RATHNAYAKE D B, AKRAMI M, PHURAILATPAM C, et al. Grid forming inverter modeling, control, and applications[J]. IEEE Access, 2021, 9: 114781-114807.
- [9] ROSSO R, WANG Xiongfei, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.
- [10] LI Yujun, XU Zhao, WONG K P. Advanced control strategies of PMSG-based wind turbines for system inertia support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3027-3037, doi: 10.1109/tpwrs.2016.2616171.
- [11] KIM J, LEE S H, PARK J W. Inertia-free stand-alone microgrid—Part II: inertia control for stabilizing DC-link capacitor voltage of PMSG wind turbine system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4060-4068, doi: 10.1109/tia.2018.2840083.
- [12] MAO Meiqin, QIAN Cheng, DING Yong, et al. Decentralized coordination power control for islanding microgrid based on PV/BES-VSG[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2018, 3(1): 14-24.
- [13] MAO Meiqin, HU Jian, DING Yong, et al. Multi-parameter adaptive power allocation strategy for microgrid with parallel PV/Battery-VSGs[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 2105-2111.
- [14] 迟永宁,江炳蔚,胡家兵,等.构网型变流器:物理本质与特征[J].高电压技术,2024,50(2):590-604.
CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 590-604(in Chinese).
- [15] WU Heng, WANG Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3573-3589.
- [16] WANG Xinshuo, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. Transient stability analysis of grid-following VSCs considering voltage-dependent current injection during fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2749-2760.
- [17] ZHAO Jiantao, HUANG Meng, YAN Han, et al. Nonlinear and transient stability analysis of phase-locked loops in grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 1018-1029.
- [18] LI Xilin, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, et al. Nonlinear modeling and stability analysis of grid-tied paralleled-converters systems based on the proposed dual-iterative equal area criterion[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 7746-7759.
- [19] XIONG Jiawang, PEI Wei, YE Hua, et al. Transient

- stability of multiple phase-locked-loop-type voltage source converters system based on amplitude mapping model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(1): 557-569.
- [20] CHENG Huijie, SHUAI Zhikang, SHEN Chao, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [21] HE Xiuqiang, PAN Sisi, GENG Hua. Transient stability of hybrid power systems dominated by different types of grid-forming devices[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(2): 868-879.
- [22] QORIA T, GRUSON F, COLAS F, et al. Current limiting algorithms and transient stability analysis of grid-forming VSCs[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106726.
- [23] SUN Huiqiang, LIN Xinchun, CHEN Songbai, et al. Transient stability analysis of the standalone solar-storage AC supply system based on grid-forming and grid-following converters during sudden load variation [J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(5): 1286-1302.
- [24] XIONG Jiawang, YE Hua, PEI Wei, et al. Nonlinear dynamic model of system with grid-following converter and grid-forming converter[C]//2022 Asia Power and Electrical Technology Conference(APET). Shanghai, China: IEEE, 2022: 122-126.
- [25] 张祥宇, 黄泳璇, 付媛. 构网型风电并网系统的振荡能量转移与功率支撑技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9251-9261.
- ZHANG Xiangyu, HUANG Yongxuan, FU Xuan. Oscillation energy transfer and power support technology for grid-forming wind power grid-connected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9251-9261 (in Chinese).
- [26] SHEN Chao, SHUAI Zhikang, SHEN Yang, et al. Transient stability and current injection design of paralleled current-controlled VSCs and virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1118-1134.
- [27] TANG Yingjie, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, et al. An improved equal area criterion for transient stability analysis of converter-based microgrid considering nonlinear damping effect[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 11272-11284.
- [28] 易相彤, 沈超, 彭也伦, 等. 基于同调等值的多变流器系统聚合降阶建模[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5664-5674.
- YI Xiangtong, SHEN Chao, PENG Yelun, et al. Aggregation reduced-order modeling of multi-converter systems based on coherency equivalence method[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5664-5674 (in Chinese).

附录

<http://ntps.epri.sgcc.com.cn/djgxcb/CN/10.13334/i.0258-8013.pcsee.240374>



王冠淇

在线出版日期: 2024-10-29。

收稿日期: 2024-02-08。

作者简介:

王冠淇(1995), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高比例新能源稳定控制技术, 并网逆变器控制策略, wangguanqi@mail.iee.ac.cn;

*通信作者: 裴玮(1982), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为交直流配电网和微网、人工智能在电气领域的应用, peiwei@mail.iee.ac.cn;

熊佳旺(1997), 男, 助理研究员, 主要研究方向为高比例新能源电力电子化配电网稳定及其控制, xiongjiawang@mail.iee.ac.cn;

李毅丰(1996), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高比例新能源稳定控制技术, 并网逆变器控制策略, liyifengfrank@mail.iee.ac.cn。

(责任编辑 邱丽萍)