

DOI:10.12158/j.2096-3203.2025.01.009

基于并联涉网变流器的电能质量协同控制策略

梁晓锐¹, 罗宇航², 张华赢¹, 涂春鸣², 刘惠聪¹, 郑宇婷²

(1. 南方电网公司新型智慧城市高品质供电联合实验室(深圳供电局有限责任公司), 广东 深圳 518020; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:基于涉网变流器开展电能质量问题治理可以有效利用变流器的剩余容量,提高治理效益,但其往往只考虑跟网型(grid-following, GFL)控制,未能充分发挥多种类变流器的调控潜力。文中基于GFL和构网型(grid-forming, GFM)涉网变流器并联系统,提出谐波补偿、电压跌落抑制等协同控制策略。首先,介绍涉网变流器的基本控制原理及数学模型。其次,针对并联系统公共耦合点(point of common coupling, PCC)的谐波补偿问题,提出谐波分次补偿方法,增强谐波补偿的灵活性,实现谐波电流在不同容量变流单元间的合理分摊。针对PCC电压跌落问题,将并联系统状态总结为正常运行、仅GFL变流单元参与电压支撑、GFL和GFM变流单元共同支撑3种工况。经补偿容量计算和无功功率分配,PCC电压可始终保持在额定电压附近。最后,通过仿真验证所提策略的可行性与优越性。

关键词:涉网变流器;跟网型(GFL);构网型(GFM);准谐振控制;谐波治理;电压支撑;电能质量

中图分类号:TM615

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)01-0079-13

0 引言

新型电力系统逐渐呈现出高比例新能源和高比例电力电子设备的“双高”趋势^[1-4]。大量新能源和电力电子设备接入以及非线性负荷增加,导致电网公共耦合点(point of common coupling, PCC)的电能质量问题日趋严峻^[5-8]。

传统电能质量治理装置,如有源电力滤波器和静止无功发生器,因其灵活可控、功能多样的优势而被广泛应用^[9-11],但使用额外的设备进行治理会增加投资成本和维护费用^[12]。由于涉网变流器与电能质量治理装置拓扑相似^[13],专家学者们提出了兼具滤波和无功补偿的多功能涉网变流器(multi-functional grid-connected converter, MFGCC)^[14-15],能在提高变流器利用率的同时减少设备占地面积和投资维护成本。

目前,针对MFGCC的研究主要集中在检测方法^[16-19]、控制策略^[20-23]等方面。文献[16]采用基于瞬时功率理论的方法,可以有效检测低次谐波,但会受锁相环(phase-locked loop, PLL)和低通滤波器性能的影响。文献[17-18]提出基于保守功率理论的补偿分量提取方法,避免引入PLL,但计算过程十分复杂。为减少低通滤波器的影响,文献[19]提出一种自适应谐波检测方法,以提高谐波电流的检测精度。在电流控制器方面,主要有比例积分(propor-

tional integral, PI)控制器、比例谐振(proportional resonance, PR)控制器等。由于MFGCC参考电流中还包含谐波、无功指令,PI控制难以实现低稳态误差跟踪。虽然PR控制可以实现对特定频率交流量的高精度跟踪,但应用时复杂度高且易引起谐振^[20]。相较于上述2种控制器,准谐振控制(quasi-resonant control, QRC)^[21]、预测-等效滑模控制^[22]、重复控制^[23]等方法因其鲁棒性强、动态响应快的优点而得到广泛应用。

涉网变流器按照控制方式可分为跟网型(grid-following, GFL)和构网型(grid-forming, GFM)^[24]控制。GFL控制灵活且具有快速功率响应能力,在新能源发电并网中应用广泛^[25]。GFM变流器因其具备频率和电压支撑能力,近年来受到广泛关注^[26-28]。MFGCC往往只考虑单一控制方式,未能充分利用两者的优良特性,随着GFM控制所占比例增加,GFL和GFM控制的协同运行日益关键^[29-33]。因此,结合GFL和GFM的优势参与电能质量辅助治理具有重要意义。

文中首先介绍了变流器的拓扑和数学模型以及并联系统的基本控制策略;其次,针对PCC处的谐波污染、电压跌落等电能质量问题,提出了GFL和GFM的协同运行策略;最后,通过仿真分析验证了所提策略的可行性。

1 并联系统构成

1.1 变流器拓扑及建模

文中GFL和GFM均采用三相两电平变流器拓

收稿日期:2024-09-20;修回日期:2024-12-05

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(090000K-C23020073)

扑,变流器经过 LC 滤波器接入电网,如图 1 所示。图中, $u_a、u_b、u_c$ 为变流器三相桥臂电压; $u_{oa}、u_{ob}、u_{oc}$ 为三相并网电压; $u_{Ca}、u_{Cb}、u_{Cc}$ 为三相电容电压; $i_{oa}、i_{ob}、i_{oc}$ 为三相并网电流; $i_{La}、i_{Lb}、i_{Lc}$ 为变流器侧三相滤波电感电流; $L_f、R_f$ 分别为滤波电感及其等效电阻; $C_f、R_d$ 分别为滤波电容及其阻尼电阻。

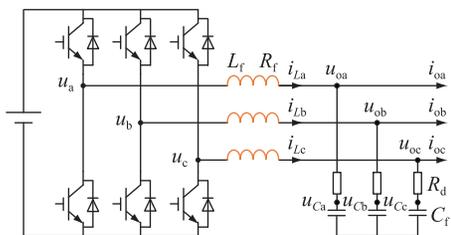


图 1 变流器拓扑

Fig.1 Topology of the converter

根据基尔霍夫定律可得单台涉网变流器在两相旋转坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} u_{od} = (1 + R_d C_f s) u_{Cd} - R_d \omega C_f u_{Cq} \\ u_{oq} = (1 + R_d C_f s) u_{Cq} + R_d \omega C_f u_{Cd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_{od}、u_{oq}$ 分别为并网电压 $d、q$ 轴分量; $u_{Cd}、u_{Cq}$ 分别为电容电压 $d、q$ 轴分量,其表达式见式(2); ω 为电网角频率。

$$\begin{cases} u_{Cd} = \frac{\omega i_{Lq} - \omega i_{oq} + s i_{Ld} - s i_{od}}{C_f (s^2 + \omega^2)} \\ u_{Cq} = \frac{s i_{Ld} - s i_{od} - (\omega i_{Lq} - \omega i_{oq})}{C_f (s^2 + \omega^2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_{Ld}、i_{Lq}$ 分别为变流器侧滤波电感电流 $d、q$ 轴分量; $i_{od}、i_{oq}$ 分别为并网电流 $d、q$ 轴分量。

1.2 并联系统结构及基本控制策略

并联系统结构及控制策略如图 2 所示。GFL 变流单元与 GFM 变流单元经过 LC 滤波器接入电网,其中 $L_{f1}、R_{f1}、C_{f1}、R_{d1}$ 分别为 GFL 变流单元的滤波电感及其等效电阻、滤波电容及其阻尼电阻; $L_{f2}、R_{f2}、C_{f2}、R_{d2}$ 分别为 GFM 变流单元的滤波电感及其等效电阻、滤波电容及其阻尼电阻; Z_g 为电网等效阻抗; $L_g、R_g$ 分别为电网电感、电网电阻; $i_{L1abc}、u_{t1abc}$ 分别为 GFL 变流单元三相滤波电感电流、电容电压; $i_{L1dq}、u_{t1dq}$ 分别为 $i_{L1abc}、u_{t1abc}$ 在 dq 坐标系下的分量; $i_{L2abc}、u_{t2abc}$ 分别为 GFM 变流单元三相滤波电感电流、电容电压; $i_{L2dq}、u_{t2dq}$ 分别为 $i_{L2abc}、u_{t2abc}$ 在 dq 坐标系下的分量; i_{L2dq}^* 为 dq 坐标系下 GFM 滤波电感电流指令; i_{labc} 为非线性负荷电流; i_{habc} 为检测出的谐波电流; i_{hdq} 为 i_{habc} 在 dq 坐标系下的分量; U_{pcc} 为 PCC 电压; $U_g、i_g$ 分别为电网电压、总的并网电流。文中忽略 GFL、GFM 变流单元直流侧电压波动,将直流侧电压视为定值。

GFL 变流单元通过 PLL 跟踪电网电压,获取 PCC 电压相位 θ_1 ,用于坐标变换与同步。文中采用基于同步坐标系的锁相环 (synchronous reference frame-phase-locked loop, SRF-PLL),其线性化模型如图 3 所示,其中 ω_1 为 PLL 输出的角频率,PLL 输出相位 θ_1 为:

$$\theta_1 = \frac{\omega}{s} = \frac{1}{s} (F_{PLL}(s) \text{Im}(U_{pcc}) + \omega_0) \quad (3)$$

式中: $F_{PLL}(s)$ 为 PLL 的 PI 控制器, $F_{PLL}(s) = K_{pp} + K_{ip}/s$, $K_{pp}、K_{ip}$ 分别为 PI 控制器的比例、积分系数; ω_0 为额定角频率。

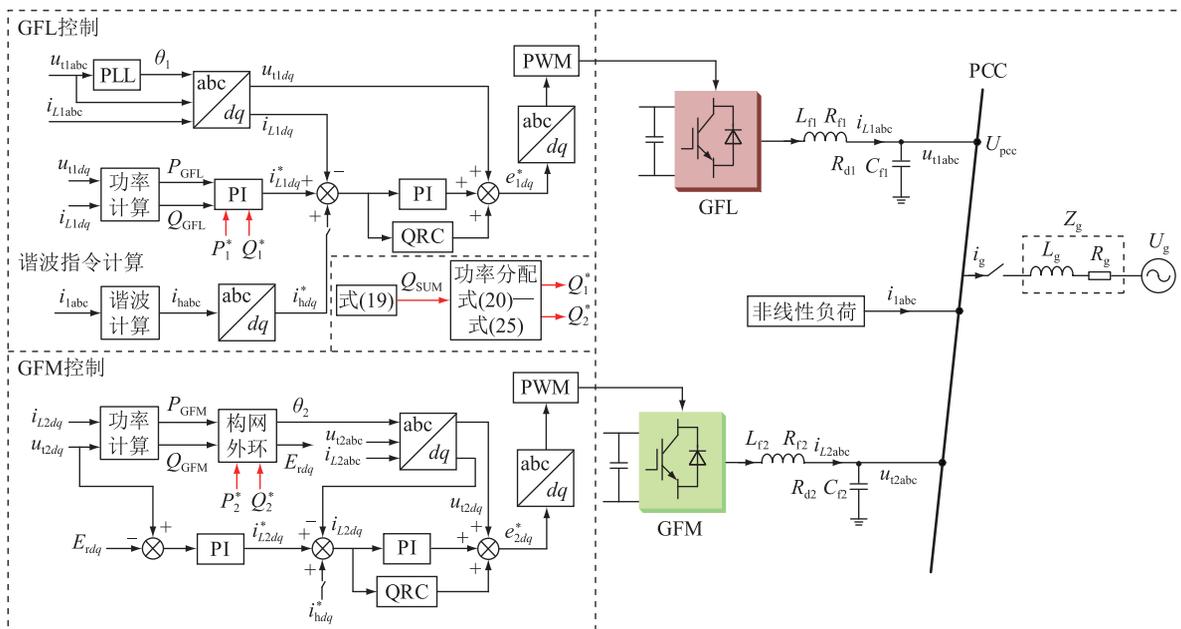


图 2 并联系统结构及控制策略

Fig.2 Structure and control strategy of parallel system

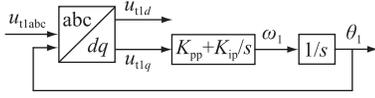


图3 SRF-PLL 结构

Fig.3 Structure of SRF-PLL

GFL 变流单元采用 PQ 控制方法:对 GFL 滤波电感电流 i_{L1abc} 、滤波电容电压 u_{t1abc} 进行 dq 变换后反馈至电流内环;同时计算出瞬时功率 P_{GFL} 、 Q_{GFL} 送入功率外环。由外部提供功率外环的指令值 P_1^* 、 Q_1^* ,并向电流内环输出滤波电感电流的指令值 i_{L1dq}^* ,如式(4)所示。内环输出 dq 坐标系下电压指令 e_{1dq}^* ,经过坐标变换、脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 环节后,送入变流器。

$$\begin{cases} i_{L1d}^* = F_p(s)(P_1^* - P_{GFL}) \\ i_{L1q}^* = F_p(s)(Q_{GFL} - Q_1^*) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F_p(s)$ 为功率外环 PI 控制器。在进行谐波辅助治理时,电流环所跟踪的指令为基波指令 i_{L1dq}^* 与谐波指令 i_{hdq}^* 的叠加,电流内环采用 PI 控制并联 QRC 的策略。

GFM 变流单元采用下垂控制策略:对 GFM 滤波电感电流 i_{L2abc} 、滤波电容电压 u_{t2abc} 进行采样后,经过 dq 变换反馈至内环;同时将 i_{L2dq} 、 u_{t2dq} 经过功率计算模块送入构网外环,生成电压 E_{rdq} 及相位 θ_2 。电压、电流内环输出变流单元 dq 坐标系下电压指令 e_{2dq}^* ,经过坐标变换、PWM 环节后,送入变流器。典型下垂外环的控制结构见图 4,下垂方程如式(5)所示。

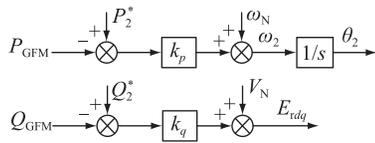


图4 GFM 变流单元的下垂控制外环

Fig.4 The droop control outer loop of GFM converter

$$\begin{cases} \omega_2 = k_p(P_2^* - P_{GFM}) + \omega_N \\ E_{rdq} = k_q(Q_2^* - Q_{GFM}) + V_N \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω_2 为 GFM 变流单元的输出角频率; P_{GFM} 、 Q_{GFM} 和 P_2^* 、 Q_2^* 分别为 GFM 变流单元输出的有功、无功功率实际值和指令值; V_N 、 ω_N 分别为 GFM 变流单元额定电压、额定角频率; k_p 、 k_q 分别为有功环、无功环的下垂系数。

2 谐波治理及谐波电流分摊策略

多种类变流器并联系统在传输功率的同时,还具备电能质量治理能力。当变流器本地存在非线

性负荷时,为保证 PCC 输出电流即并网总电流的波形质量,在 GFL 和 GFM 变流单元的控制策略中加入谐波指令,并利用 PI 控制并联 QRC 对其准确跟踪,在实现可再生能源并网的基础上复合谐波治理功能。

2.1 谐波电流的检测

谐波的准确检测是实现谐波治理功能的前提。文中采用文献[19]中的检测方法,首先对输入电流进行加权处理,再采用自适应算法更新权值,从而获得最优权值,使加权后的输出电流与参考电流的误差最小。谐波检测方法的原理如图 5 所示。其中, i_{laf} 、 i_{lbf} 、 i_{lcf} 为三相非线性负荷电流的基波分量。

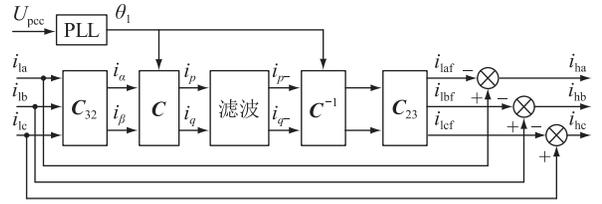


图5 谐波检测

Fig.5 Harmonic detection

首先,通过坐标变换矩阵 C_{32} 将 i_{la} 、 i_{lb} 、 i_{lc} 转换为 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量 i_α 、 i_β ,再利用矩阵 C 将其转换为 dq 坐标系下的有功分量 i_p 与无功分量 i_q 。各坐标变换矩阵及电流 i_p 、 i_q 的表达式为:

$$\begin{cases} C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \\ C_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \\ C = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{\tau=1}^{\infty} \pm i_\tau \cos((\mp 3n)\omega t \mp \varphi_\tau) \\ \sum_{\tau=1}^{\infty} \pm i_\tau \sin((\mp 3n)\omega t \mp \varphi_\tau) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: τ 为谐波次数且 $\tau = 3n \pm 1$ (n 取整数, $n = 0$ 时 $\tau = 1$), $\tau = 3n + 1$ 时取上符号, $\tau = 3n - 1$ 时取下符号; i_τ 、 φ_τ 分别为第 τ 次谐波的幅值和初相位。电网中常见的谐波源为三相不控整流负载,主要含 $6n \pm 1$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 次谐波。为滤除三相静止坐标系下

负载电流中的 $6n \pm 1$ 次谐波电流,式(8)可表示为:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{\tau=1}^{\infty} \pm i_{\tau} \cos((\mp 6n)\omega t \mp \varphi_{\tau}) \\ \sum_{\tau=1}^{\infty} \pm i_{\tau} \sin((\mp 6n)\omega t \mp \varphi_{\tau}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\tau = 6n \pm 1$ (n 取整数, $n=0$ 时 $\tau=1$), $\tau = 6n+1$ 时取上符号, $\tau = 6n-1$ 时取下符号。

将 i_p, i_q 作为输入,通过自适应滤波器后得到 i_p, i_q 的直流分量 i_{p-}, i_{q-} ,再经过变换矩阵后得到负载电流基波分量,最后与负载电流作差可获取谐波分量。

2.2 复合指令的跟踪与谐波电流分摊控制

PI 控制器可无静差跟踪直流量,但当被控对象为基波指令与谐波指令的叠加时,PI 控制器难以实现准确跟踪。而 QRC 在谐振频率处具有无穷大增益,能够实现对交流量的零稳态误差控制。因此,采用 PI 控制并联 QRC 的策略,可以提升对复合指令的控制效果。

QRC 的传递函数为:

$$G(s) = \frac{2K_R\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_x^2} \quad (10)$$

式中: K_R 为 QRC 控制器的积分系数; ω_c 为 QRC 控制器的截止频率; ω_x 为 QRC 控制器的谐振频率。

dq 坐标变换使得三相静止坐标系下第 n 次谐波变为 dq 坐标系下的第 $n-1$ 次、第 $n+1$ 次谐波,所以负载电流谐波中 5 次分量及 7 次分量均变为 6 次分量。因此,在 dq 坐标系下,须使用谐振频率为 6 倍基波角频率的 QRC 控制器跟踪 5 次、7 次谐波。

除谐波抑制外,变流单元还可能利用闲置容量开展其他电能质量治理任务。由于 2 种变流器的容量、运行工况存在差异,文中提出分次补偿的方法,以实现谐波治理任务的分摊。采用三相不控整流电路作为典型非线性负荷,其主要含有 $6n \pm 1$ 次特征谐波,且谐波次数越高,谐波幅值越小。因此,对于容量较大的 GFL 变流单元,引入谐振频率为 6 倍基波角频率的 QRC 控制器,承担 5 次、7 次谐波的抑制任务;对于容量较小的 GFM 变流单元,引入谐振频率为 12 倍基波角频率的 QRC 控制器,分摊 11 次、13 次谐波的治理任务。2 种变流单元电流内环控制器的结构分别见图 6(a)、(b)。图 6 中, K_{pc}, K_{ic} 分别为电流内环 PI 调节器的比例、积分系数。

3 电压协同支撑策略

3.1 并联系统功率传输特性

GFL 和 GFM 变流单元均通过 PCC 向电网传输

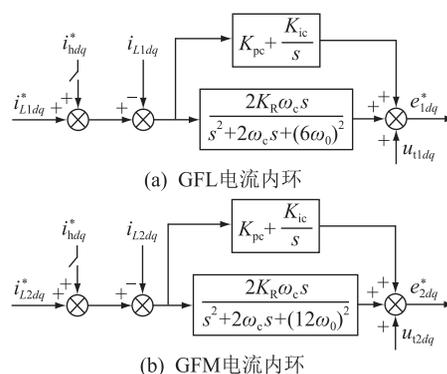


图 6 PI 控制并联 QRC

Fig.6 PI control parallel QRC

功率,以 PCC 为分析节点,将并联系统简化为图 7 所示结构。

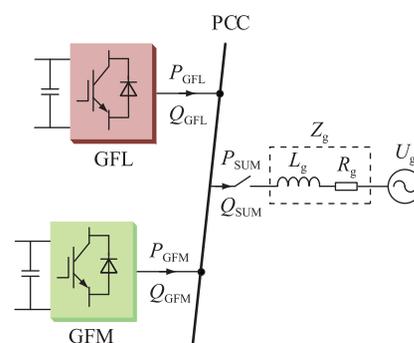


图 7 并联系统简化模型

Fig.7 Simplified model of parallel system

GFL 变流单元额定有功功率为 40 kW,按照有功功率的 1.2 倍裕度设计其允许容量,即容量 S_{GFL} 为 48 kV·A,则最大无功功率为 26 kvar;较小容量的 GFM 变流单元额定有功功率为 10 kW,容量 S_{GFM} 为 12 kV·A,则最大无功功率为 6.5 kvar。

GFL 和 GFM 变流单元输出功率均在 dq 坐标系下进行计算,分别如式(11)、式(12)所示。

$$\begin{cases} P_{GFL} = \frac{3}{2}(u_{1d}i_{L1d} + u_{1q}i_{L1q}) \\ Q_{GFL} = \frac{3}{2}(u_{1q}i_{L1d} - u_{1d}i_{L1q}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{GFM} = \frac{3}{2}(u_{2d}i_{L2d} + u_{2q}i_{L2q}) \\ Q_{GFM} = \frac{3}{2}(u_{2q}i_{L2d} - u_{2d}i_{L2q}) \end{cases} \quad (12)$$

GFL 和 GFM 变流单元输出功率之和即为 PCC 向外输出的总功率,如式(13)所示。

$$\begin{cases} P_{SUM} = P_{GFM} + P_{GFL} \\ Q_{SUM} = Q_{GFM} + Q_{GFL} \end{cases} \quad (13)$$

并联系统通过电网阻抗与电网电压连接,其功率电路关系式为:

$$\begin{bmatrix} U_{pccd} \\ U_{pccq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_g s + R_g & -\omega_0 L_g \\ \omega_0 L_g & L_g s + R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{gd} \\ U_{gq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: U_{pccd} 、 U_{pccq} 分别为 PCC 电压的 d 、 q 轴分量; U_{gd} 、 U_{gq} 分别为电网电压的 d 、 q 轴分量; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为并网电流的 d 、 q 轴分量。

在坐标变换中设置 d 轴方向与电压矢量方向相同,使得 $U_{pccq} = 0$,则 PCC 向外输出的总功率为:

$$\begin{cases} P_{\text{SUM}} = \frac{3}{2} U_{pccd} i_{gd} \\ Q_{\text{SUM}} = -\frac{3}{2} U_{pccd} i_{gq} \end{cases} \quad (15)$$

电路参数及传输总有功功率 P_{SUM} 不变时,根据式(14)获取 U_{pcc} 与 U_g 间的关系曲线,如图 8 所示。

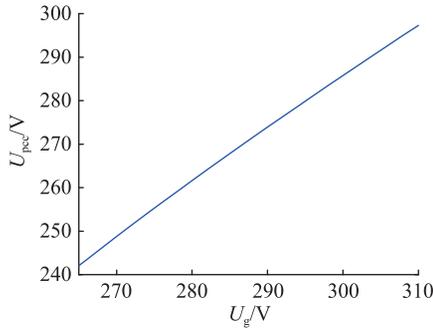


图 8 电网电压与 PCC 电压的关系

Fig.8 The relationship between U_g and U_{pcc}

由图 8 可知,当 U_g 跌落时, U_{pcc} 随之跌落。 $P_{\text{SUM}} = 50 \text{ kW}$ 时,由于电网阻抗上存在压降, U_{pcc} 低于额定值。

并联系统协同电压支撑的关键在于无功容量的分配,因此,考虑建立 U_{pcc} 与 PCC 向外输出的总无功功率间的关系式。联立式(14)和式(15)得:

$$\begin{cases} U_{gd} = U_{pccd} - \frac{2}{3} R_g P_{\text{SUM}} / U_{pccd} - \frac{2}{3} \omega_0 L_g Q_{\text{SUM}} / U_{pccd} \\ U_{gq} = -\frac{2}{3} \omega_0 L_g P_{\text{SUM}} / U_{pccd} + \frac{2}{3} R_g Q_{\text{SUM}} / U_{pccd} \end{cases} \quad (16)$$

引入中间变量 d_1 、 d_2 :

$$\begin{cases} d_1 = \frac{2}{3} (-\omega_0 L_g P_{\text{SUM}} + R_g Q_{\text{SUM}}) \\ d_2 = \frac{2}{3} (-\omega_0 L_g Q_{\text{SUM}} - R_g P_{\text{SUM}}) \end{cases} \quad (17)$$

又因为电网电压幅值与其分量的关系为:

$$U_{gd}^2 + U_{gq}^2 = |U_g|^2 \quad (18)$$

联立式(16)一式(18)可得:

$$U_{pccd}^2 + (2d_2 - |U_g|^2) U_{pccd} + d_1^2 + d_2^2 = 0 \quad (19)$$

依据式(19),在已知电网电压幅值、变流器传输功率的条件下,即可求解 U_{pcc} 。设置 Q_{SUM} 输出范围为 $0 \sim 40 \text{ kvar}$, U_g 波动范围为 $0.85 \sim 1.00 \text{ p.u.}$,可得注入无功功率在不同电压跌落程度下对 PCC 电压的抬升效果,如图 9 所示。

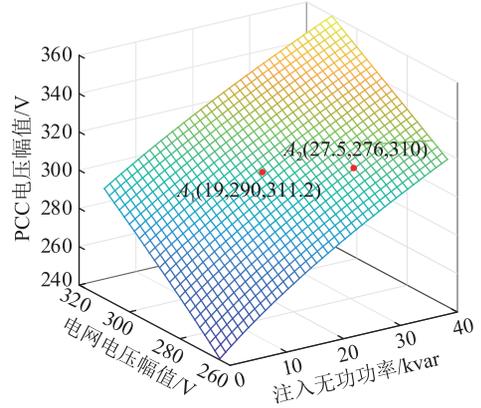


图 9 不同无功功率下 U_{pcc} 变化曲面

Fig.9 The U_{pcc} variation surface under different reactive powers

根据图 9 可直观判断不同电网电压跌落程度下注入指定无功功率对 U_{pcc} 的抬升效果,或将 U_{pcc} 抬升至指定范围时所需的无功补偿功率,避免了重复分析计算。由图 9 中点 A_1 、 A_2 可知,当 U_g 跌落至 290 V 和 276 V 时,将 U_{pcc} 支撑至额定值附近时所需的无功功率分别为 19 、 27.5 kvar 。为简化分析,文中忽略电网阻抗的变化。实际应用中,当电网阻抗变化时,通过文献[34]所提方法实时测量电网阻抗、连续估计电网电感,再应用文中所提计算方法,即可评估不同电网阻抗条件下电压跌落时所需的无功功率。

3.2 并联系统电压支撑工况分析

变流单元参与治理、并联系统参与电压支撑运行时包括正常运行、仅 GFL 变流单元参与电压支撑、GFL 和 GFM 变流单元共同支撑 3 种工况。为简化分析,文中仅考虑 U_g 三相电压对称跌落情况, U_g 的波动范围为 $0.85 \sim 1.00 \text{ p.u.}$ 。并联系统的工况划分如图 10 所示。

首先,初始化相关参数,如给定变流单元的初始控制参数,采集相关电气量信息。初始时,变流单元处于正常运行工况,工作在单位功率因数模式,均只按照指令值输出有功功率。

当检测到 U_{pcc} 低于额定值时,视为存在电压跌落,须输出一定的无功功率进行电压支撑,结合电压跌落程度和电路的功率传输关系,按照式(11)一式(19)计算将 U_{pcc} 支撑至额定值时所需的无功容量,并根据 U_{pcc} 是否低于 280 V 来选择工况。当 U_{pcc}

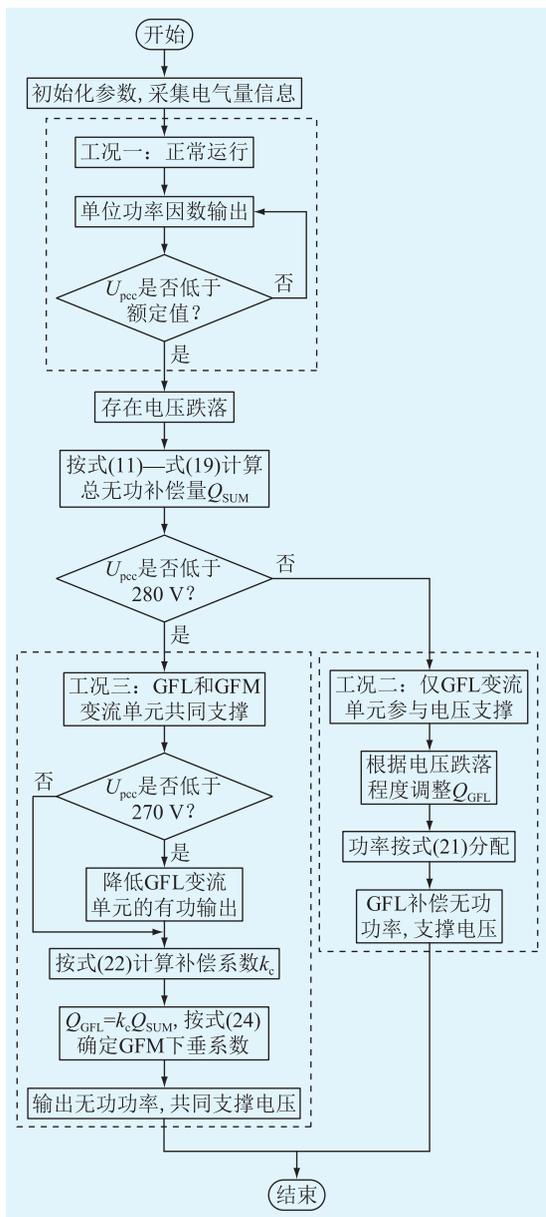


图 10 并联系统工况划分

Fig.10 Working conditions of parallel system

大于等于 280 V 时, 切换为工况二, 仅需要 GFL 变流单元进行电压支撑; 当 U_{pcc} 低于 280 V 时, 切换为工况三, 需要 GFL 和 GFM 变流单元共同支撑电压。

系统工作在工况三时, 须判断 U_{pcc} 是否低于 270 V 来决定是否需要降低有功功率输出。当 U_{pcc} 大于等于 270 V 时, 无须降低 GFL 变流单元的有功输出, 按照式 (22) 一式 (24) 计算补偿系数和下垂系数, 完成无功功率分配, 即可实现电压支撑; 当 U_{pcc} 低于 270 V 时, 须降低 GFL 变流单元的有功输出, 再计算补偿系数、下垂系数等, 重新进行功率分配, 使得 U_{pcc} 始终保持在额定电压附近。

3.2.1 GFL 和 GFM 变流单元正常运行(工况一)

正常运行工况下, GFL 和 GFM 变流单元工作在

单位功率因数模式, 均只输出有功功率, GFL 并网的有功和无功指令分别为 40 kW 和 0, GFM 并网的有功和无功指令分别为 10 kW 和 0, 其功率分配关系如式 (20) 所示。

$$\begin{cases} P_{GFL} = P_1^* \\ Q_{GFL} = 0 \\ P_{GFM} = P_2^* \\ Q_{GFM} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

3.2.2 仅 GFL 变流单元参与电压支撑(工况二)

仅 GFL 变流单元参与电压支撑后的 U_{pcc} 边界如图 11 所示。可知, 当 U_g 大于 280 V 时, 所需的总无功功率 Q_{SUM} 小于 GFL 变流单元的最大无功补偿功率, 此时电压支撑任务仅由 GFL 变流单元承担, 功率分配关系如式 (21) 所示。

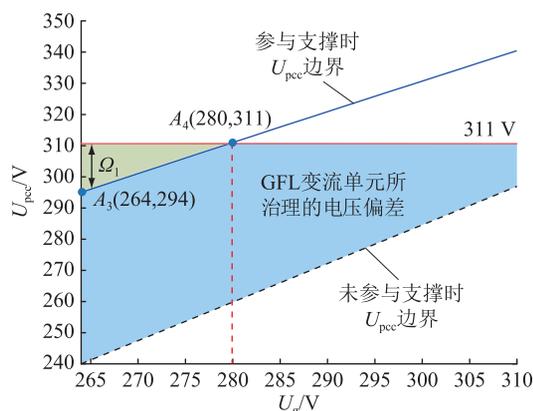


图 11 仅 GFL 变流单元参与电压支撑后的 U_{pcc} 边界

Fig.11 The U_{pcc} boundary after only GFL converter is involved in voltage support

$$\begin{cases} P_{GFL} = P_1^* \\ Q_{GFL} = Q_{SUM} \\ P_{GFM} = P_2^* \\ Q_{GFM} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

3.2.3 GFL 和 GFM 变流单元共同支撑(工况三)

当 U_g 跌落至 280 V 以下时, GFL 变流单元输出最大无功功率, PCC 仍存在电压偏差 Ω_1 , 须协同 GFM 变流单元进行电压支撑, 两者按照补偿系数进行无功功率分摊。GFL 的补偿系数 k_c 计算如式 (22) 所示, 其功率分摊关系如式 (23) 所示。

$$k_c = \frac{S_{c1}}{S_{c1} + S_{c2}} = \frac{\sqrt{S_{GFL} - (P_1^*)^2}}{\sqrt{S_{GFL} - (P_1^*)^2} + \sqrt{S_{GFM} - (P_2^*)^2}} \quad (22)$$

$$\begin{cases} Q_{GFL} = k_c Q_{SUM} \\ Q_{GFM} = (1 - k_c) Q_{SUM} \end{cases} \quad (23)$$

式中: S_{c1} 、 S_{c2} 分别为 GFL、GFM 变流单元的闲置

容量。

获取 GFM 变流单元的补偿功率后,参照文献 [35],按照允许电压偏差 1 V、无功补偿容量 S_{c2} 设计 GFM 的无功-电压下垂系数,如式(24)所示。调整下垂系数后,基于无功-电压下垂特性,GFM 主动输出无功功率,支撑电压。

$$k_q = \frac{V_N - V_{\min}}{S_{c2} - 0} \quad (24)$$

式中: V_{\min} 为允许的 PCC 电压偏差。

2 种变流单元共同补偿时,将 Q_{SUM} 设置为 32.5 kvar,由式(19)构建 2 种变流单元共同支撑后的 U_{pcc} 边界,如图 12 所示,其中 Ω_2 为 GFM 变流单元所治理的电压偏差。

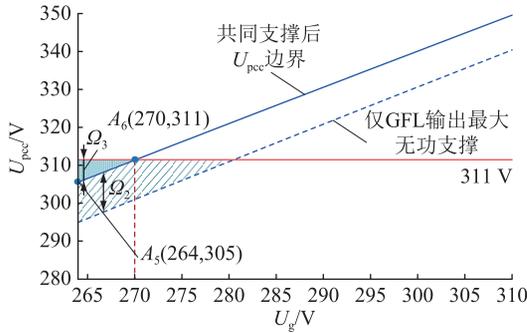


图 12 共同支撑后的 U_{pcc} 边界

Fig.12 The U_{pcc} boundary after coordinated support

由图 12 可知,当 U_g 低于 270 V 时,在有功指令不变的情况下,即使两者补偿能力达到极限时仍存在电压偏差 Ω_3 。考虑基于变流器的并网设备多为新能源或储能,其输出功率可能低于额定功率,因此,当电压跌落严重时,为满足电压跌落抑制的需求,应充分利用各变流单元的闲置容量,降低其有功输出,增加无功输出。因此,利用式(19)重新计算无功容量后,须考虑变流单元的有功输出情况,按照式(25)计算补偿系数,以此分摊无功容量。

$$k_c = \frac{S_{c1}}{S_{c1} + S_{c2}} = \frac{\sqrt{S_{\text{GFL}} - P_{\text{GFL}}^2}}{\sqrt{S_{\text{GFL}} - P_{\text{GFL}}^2} + \sqrt{S_{\text{GFL}} - P_{\text{GFM}}^2}} \quad (25)$$

4 仿真实验

为验证所提谐波治理策略与电压协同支撑策略的可行性,在 MATLAB/Simulink 中搭建多种类变流器并联系统仿真模型,相关参数如表 1、表 2 和表 3 所示。

4.1 谐波治理功能仿真实验

采用三相桥式不控整流电路带阻感负载作为典型非线性负荷,接入后并网电流中将增加谐波电

表 1 变流器容量

Table 1 Capacities of the converter

参数	数值
GFL 变流单元容量 $S_{\text{GFL}}/(\text{kV}\cdot\text{A})$	48
GFL 变流单元并网有功功率 P_1^*/kW	40
GFL 变流单元并网无功功率 Q_1^*/kvar	0
GFM 变流单元容量 $S_{\text{GFM}}/(\text{kV}\cdot\text{A})$	12
GFM 变流单元并网有功功率 P_2^*/kW	10
GFM 变流单元并网无功功率 Q_2^*/kvar	0

表 2 主要电路参数

Table 2 Main circuit parameters

参数	数值
直流侧电压 V_{dc}/V	800
电网电压 U_g/V	311
GFL 变流单元滤波电感 L_{f1}/mH	3
GFM 变流单元滤波电感 L_{f2}/mH	3
电网电感 L_g/mH	2.5
GFL 变流单元滤波电容 C_{f1}/mF	50
GFM 变流单元滤波电容 C_{f2}/mF	50
电网基频 f/Hz	50
开关频率 f_{sw}/kHz	10
GFL 变流单元滤波电感等效电阻 R_{f1}/Ω	0.01
GFM 变流单元滤波电感等效电阻 R_{f2}/Ω	0.01
电网电阻 R_g/Ω	0.001
GFL 变流单元滤波电容阻尼电阻 R_{d1}/Ω	1.5
GFM 变流单元滤波电容阻尼电阻 R_{d2}/Ω	1.5

表 3 主要控制参数

Table 3 Main control parameters

参数	数值
PLL 的 PI 控制器比例系数 K_{pp}	2.377 6
PLL 的 PI 控制器积分系数 K_{ip}	869.667
GFL 功率环 PI 控制器比例系数 K_{ps}	0.001 5
GFL 功率环 PI 控制器积分系数 K_{is}	1
GFM 有功环下垂系数 k_p	0.000 2
GFM 无功环下垂系数 k_q	0.03

流,各次谐波含量如图 13 所示。由图 13 可知,各次谐波含量与谐波次数成反比;谐波主要为 5 次、7 次和 11 次谐波,分别占比 14.58%、7.48%、1.25%。

0.2 s 时,GFL 和 GFM 变流单元有功指令分别为 30、10 kW,无功指令均设置为 0,系统接入非线性负荷运行。0.3 s 时,在 2 种变流单元中投入谐波指令,使其输出谐波分量对非线性负荷支路电流进行补偿。0.4 s 时,GFL 变流单元有功指令调整为 35 kW。治理后并网电流各次谐波占比及仿真波形分别如图 14、图 15 所示,GFL 和 GFM 变流单元输

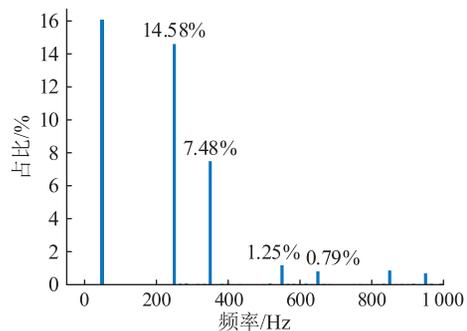


图 13 治理前并网电流各次谐波占比

Fig.13 The proportion of each harmonic of grid-connected current before control

出电流仿真波形及各次谐波占比分别如图 16、图 17 所示。

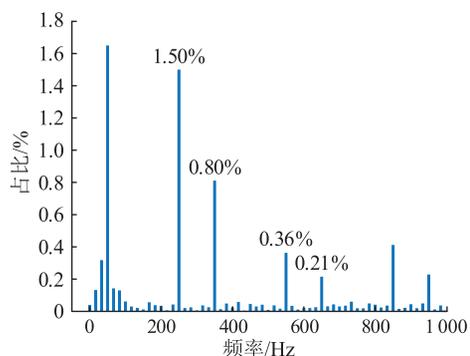


图 14 治理后并网电流各次谐波占比

Fig.14 The proportion of each harmonic of grid-connected current after control

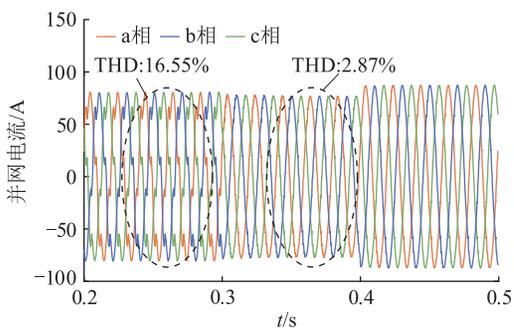
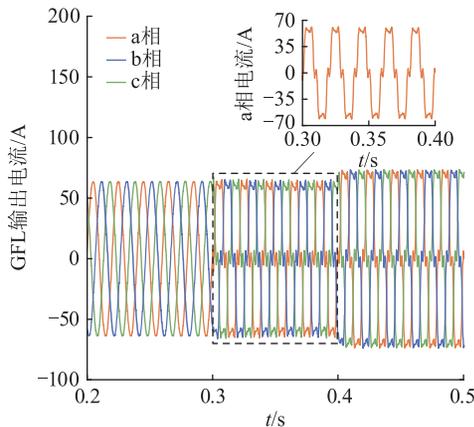


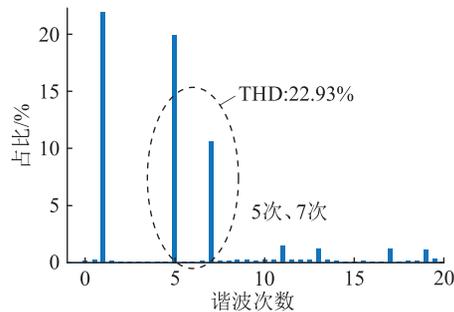
图 15 并网电流仿真波形

Fig.15 The simulation waveforms of grid-connected current

由图 14、图 15 可知,加入谐波抑制功能前,并网电流畸变明显,总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)为 16.55%;加入谐波抑制功能后,电能质量治理效果明显,并网电流波形平滑,THD 降低至 2.87%,且 5 次、7 次、11 次谐波电流的含量均显著降低。由图 16、图 17 可知,2 种变流单元因输出谐波电流而产生畸变,GFL 变流单元主要输出 5 次、7 次谐波,而 GFM 变流单元主要输出 11 次、13 次谐波,验证了所提分摊控制策略的有效性。



(a) GFL 输出电流仿真波形



(b) 治理后各次谐波占比

图 16 GFL 变流单元输出电流仿真波形及治理后各次谐波占比

Fig.16 The simulation waveforms of GFL converter output current and the percentage of harmonics after control

4.2 电压协同支撑功能仿真验证

4.2.1 GFL 和 GFM 变流单元正常运行仿真验证(工况一)

并联系统初始工作于单位功率因数模式,GFL、GFM 变流单元有功指令分别为 40、10 kW,无功指令均为 0。0.4 s 时,GFM 有功指令降低至 6 kW,GFL 有功指令降低至 30 kW。仿真结果如图 18、图 19 所示,可以看出,在正常工况下,有功指令突变时,GFL 和 GFM 变流单元能够快速跟踪指令。由图 18 可知,由于存在电网阻抗,传输功率较大时,PCC 电压具有 10 V 左右的偏差;传输功率减小时,电压偏差随之减小。

4.2.2 仅 GFL 变流单元参与电压支撑仿真验证(工况二)

初始时,系统工作在单位功率因数模式,GFL 和 GFM 变流单元有功指令分别为 40、10 kW,无功功率输出为 0。0.4 s 和 0.6 s 时, U_g 三相电压对称跌落,依据所提控制策略,按照式(21)对无功功率进行分配。0.6 s 时, U_g 三相电压对称跌落至 290 V,PCC 电压对应为 285 V,由图 9 可知所需总无功补偿容量为 19 kvar,且仍由 GFL 变流单元进行补偿。

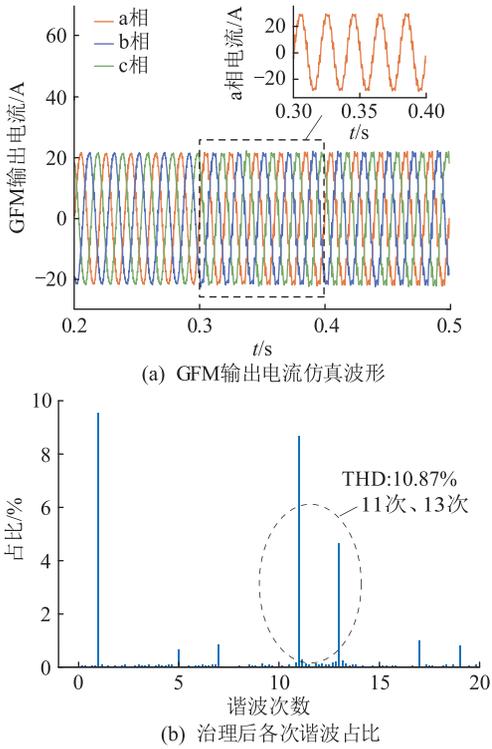


图 17 GFM 变流单元输出电流仿真波形及治理后各次谐波占比

Fig.17 The simulation waveforms of GFM converter output current and the percentage of harmonics after control

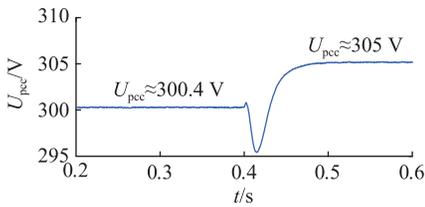


图 18 正常运行工况下 PCC 电压

Fig.18 The PCC voltage under normal operating conditions

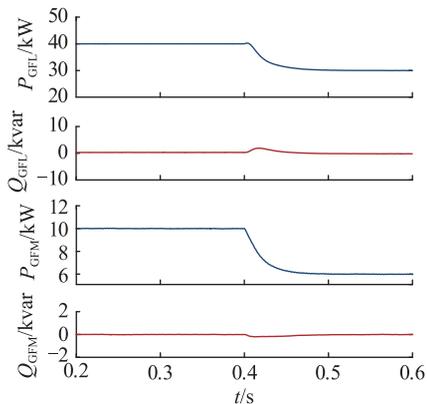


图 19 正常运行工况下输出功率波形

Fig.19 The output power waveforms under normal operating conditions

输出功率变化结果及 GFL 变流单元参与电压支撑前后的 PCC 电压分别如图 20、图 21 所示。

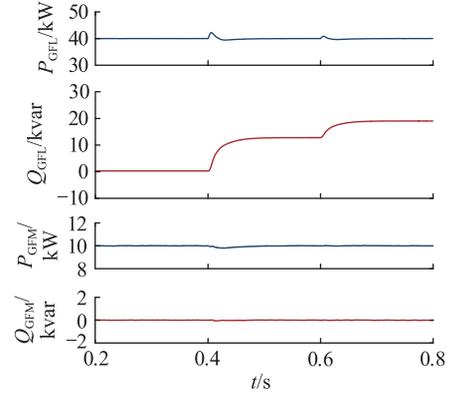


图 20 仅 GFL 变流单元参与电压支撑时输出功率波形
Fig.20 The output power waveforms when only GFL converter is involved in voltage support

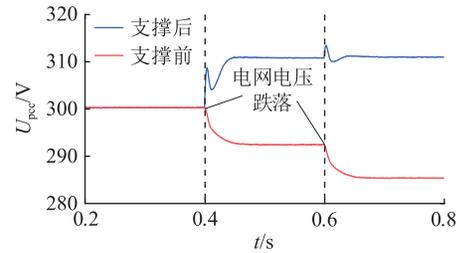


图 21 仅 GFL 变流单元参与时电压支撑效果
Fig.21 The voltage support effect when only GFL converter is involved

由图 20、图 21 可知,GFL 变流单元参与电压支撑前,当 U_g 跌落至 300 V 时,PCC 电压约为 292 V,存在较大电压偏差;支撑后,GFL 变流单元输出 12.7 kvar 无功,使得 PCC 电压恢复至 311 V 附近。PCC 电压继续下降至 285 V,GFL 变流单元无功输出增加至 19 kvar,能够实现对 PCC 电压的准确支撑。

4.2.3 GFL 和 GFM 变流单元共同支撑仿真验证(工况三)

(1) U_g 三相电压对称跌落约 0.11 p.u.所需无功补偿容量为 27.5 kvar,GFL 变流单元协同 GFM 变流单元进行电压支撑。由式(22)可得有功指令不变时所对应的补偿系数为 0.8,按照式(23)的功率分配关系可得,GFL 和 GFM 应补偿的无功功率分别为 22、5.5 kvar。输出功率变化结果及对 PCC 电压的支撑结果分别如图 22、图 23 所示。由图 23 可知,当电网电压跌落 0.11 p.u.,PCC 电压降低至 259 V,仅考虑 GFL 变流单元进行电压支撑时,PCC 电压约为 307 V,仍存在电压偏差;GFL 和 GFM 变流单元共同支撑后,电压恢复至额定电压附近,可改善电压支撑效果。

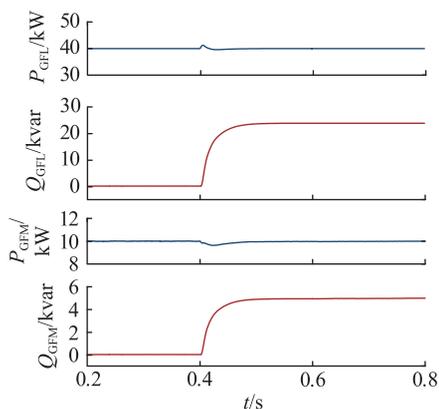


图 22 GFL 和 GFM 变流单元共同支撑时的输出功率波形
Fig.22 The output power waveforms of GFL and GFM converter is coordinated

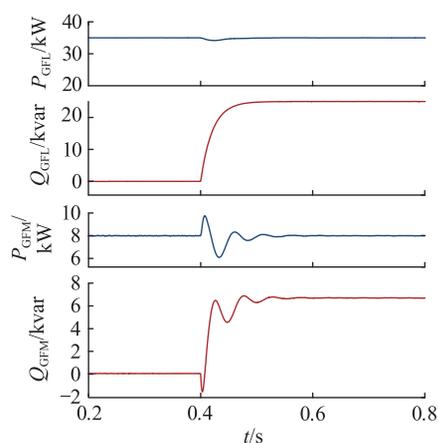


图 24 电压跌落较深时输出功率波形
Fig.24 The output power waveforms in case of deeper voltage drops

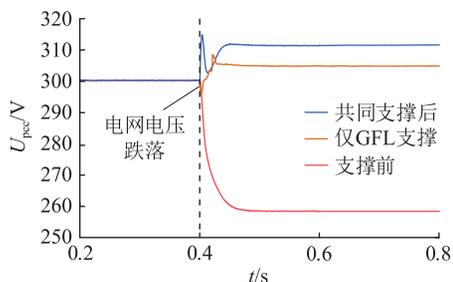


图 23 共同支撑与 GFL 单独支撑对比
Fig.23 Comparison between the effect of synergistic support voltage and GFL support voltage alone

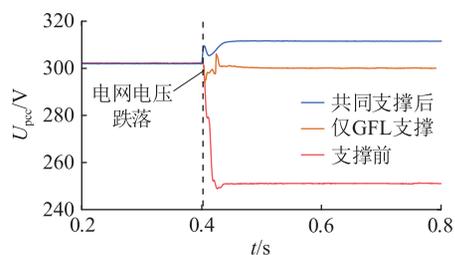


图 25 电压跌落较深时共同支撑与 GFL 单独支撑对比
Fig.25 Comparison between the effect of synergistic voltage support and GFL support voltage alone for deeper voltage drops

(2) 当 U_g 三相电压对称跌落 0.15 p.u. 时, 考虑 2 种变流单元有功功率波动, 输出功率应低于额定功率。GFL 和 GFM 输出的有功指令分别为 35、8 kW, 基于式 (19) 重新计算所需无功容量为 32 kvar, 按照式 (25) 计算补偿系数为 0.214, 进而计算各自分摊的无功容量分别为 25.2、6.8 kvar, 得到无功指令与对应的下垂系数。仿真结果如图 24、图 25 所示, 输出功率与所得计算结果接近, 且由图 25 可知, GFL 变流单元单独支撑时, PCC 电压为 298 V, 仍存在较大电压偏差; GFL 和 GFM 变流单元共同支撑后, PCC 电压可恢复至额定电压附近。协同控制后的支撑效果明显优于 GFL 变流单元单独支撑, 验证了所提策略的正确性。

由上述分析可知, 未进行电压支撑时, PCC 电压随 U_g 跌落而下降, 电能质量恶化。在电压跌落程度较低时, GFL 变流单元通过控制可实现准确的电压支撑; 但当电压跌落程度较深时, 仅采用 GFL 进行支撑仍存在电压偏差。采用协同控制后, 并联系统能够快速输出功率, 实现电压支撑, 减小 PCC 电压偏差。电压跌落后所需的补偿功率的仿真结果与理论分析一致。由此可见, 当电网电压跌落时, 采用所提控制策略, 可以准确支撑 PCC 电压, 改善

电能质量问题。

5 结论

针对电能质量控制, 文中提出了一种具备电能质量主动治理功能的多变流器运行策略, 主要工作及结论如下。

(1) 对于 PCC 的谐波污染问题, 提出了基于不同容量变流分次治理的思想, 实现了对 5 次、7 次、11 次等谐波的有效治理以及谐波电流的分摊, 并具备较快的响应速度。

(2) 利用数值计算方法, 分析了 PCC 有功、无功输出与电网电压的关系, 并刻画了不同无功功率注入下的 PCC 电压变化曲面, 可直观分析所需补偿容量。

(3) 对于电压跌落问题, 将并联系统的状态总结为 3 种工况: 正常运行、仅 GFL 变流单元参与电压支撑、GFL 和 GFM 变流单元共同支撑, 通过补偿容量计算、补偿系数计算及无功功率分配, 实现了电压的准确支撑。

参考文献:

[1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与

- 展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 肖先勇,郑子莹. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术,2022,54(1):47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.
- [3] 王祺,张泽轲,郭杰帅,等. 新型电力系统主动构网机理与技术路径[J]. 中国电机工程学报,2024,44(2):504-517.
WANG Qi, ZHANG Zeke, GUO Jieshuai, et al. Mechanism and technical path of active grid-forming of new type power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 504-517.
- [4] 贾宏杰,穆云飞. 新型电力系统中的综合能源关键技术[J]. 全球能源互联网,2023,6(5):445-446.
JIA Hongjie, MU Yunfei. Key technologies of integrated energy in new power system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 445-446.
- [5] 何晋伟,孟维奇,蒋玮,等. 新能源配电网电能质量典型问题分析及应对策略[J]. 高电压技术,2023,49(7):2983-2994.
HE Jinwei, MENG Weiqi, JIANG Wei, et al. Power quality problems in renewable energy power distribution systems: analysis and solutions [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2983-2994.
- [6] 魏妍萍,王军,李南帆. 可再生能源接入对电网电能质量的影响分析[J]. 电网与清洁能源,2022,38(1):108-114.
WEI Yanping, WANG Jun, LI Nanfan. An analysis of the influence of grid-connected renewable energy on power quality of power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 108-114.
- [7] 张磊,徐恭德,孙慧如,等. 直流配用电系统电能质量问题探讨[J]. 供用电,2023,40(10):28-34.
ZHANG Lei, XU Gongde, SUN Huiru, et al. Discussion on the power quality of DC distribution system[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(10): 28-34.
- [8] 肖白,赵雪纯,董光德. 电能质量综合评估方法综述与展望[J]. 发电技术,2024,45(4):716-733.
XIAO Bai, ZHAO Xuechun, DONG Guangde. Summary and prospect of comprehensive evaluation methods of power quality [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4): 716-733.
- [9] 张震霄,年珩,李培,等. 储能型统一电能质量调节器电压补偿能力分析 & 提升方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(23):151-159.
ZHANG Zhenxiao, NIAN Heng, LI Pei, et al. Voltage compensation capability analysis and improvement method for unified power quality conditioner with energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 151-159.
- [10] 侯世玺,汪成,付士利,等. 有源电力滤波器神经终端滑模控制[J]. 太阳能学报,2023,44(2):279-287.
HOU Shixi, WANG Cheng, FU Shili, et al. Neural terminal sliding mode control for active power filter[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2023, 44(2): 279-287.
- [11] 梁艺超,崔江丽,郭晓敏,等. SVG 动态无功补偿在特殊领域的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(3):1-8.
LIANG Yichao, CUI Jiangli, GUO Xiaomin, et al. Application of SVG dynamic reactive power compensation in special field [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 1-8.
- [12] 李志军,李格格,张家安. 电能质量变权综合评估及多功能并网逆变器多目标优化[J]. 太阳能学报,2022,43(11):515-521.
LI Zhijun, LI Gege, Zhang Jiaan. Power quality variable weight comprehensive evaluation and multiobjective optimization of multifunctional grid-connected inverter[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2022, 43(11): 515-521.
- [13] 张成,赵涛,朱爱华,等. 弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J]. 电力工程技术,2022,41(3):224-230.
ZHANG Cheng, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Stability and power quality control of parallel inverters in weak current network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 224-230.
- [14] 王果,武旭,李龙,等. 光伏多功能并网逆变器不同出力状态下无功和谐波优化方法[J]. 电力自动化设备,2024,44(1):80-87.
WANG Guo, WU Xu, LI Long, et al. Optimization method of reactive power and harmonic for photovoltaic multi-function grid-connected inverter under different output states[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 80-87.
- [15] 石磊,周宏涛,赵元莘,等. 光伏多功能并网逆变器迭代 SMC+LADRC 电流内环控制策略研究[J]. 智慧电力,2023,51(4):107-114.
SHI Lei, ZHOU Hongtao, ZHAO Yuanshen, et al. Iterative SMC+LADRC current inner loop control strategy of photovoltaic multi-function grid connected inverter[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 107-114.
- [16] LIN Y, LAN J C, WANG L H, et al. A multifunctional inverter power quality coordinated optimization strategy based on comprehensive evaluation [J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12: 1431874.
- [17] DARAVATH R, SANDEPUDI S R. Control of multifunctional inverter to improve power quality in grid-tied solar photovoltaic systems[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2023, 24(6): 743-754.
- [18] PAREDES H K M, RODRIGUES D T, CEBRIAN J C, et al. CPT-based multi-objective strategy for power quality enhancement in three-phase three-wire systems under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. IEEE Access, 2021, 9: 53078-53095.

- [19] 张建忠,耿治,徐帅,等. 一种有源电力滤波器的改进自适应谐波检测算法[J]. 电工技术学报,2019,34(20):4323-4333.
ZHANG Jianzhong,GENG Zhi,XU Shuai,et al. An improved adaptive harmonic detection algorithm for active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(20):4323-4333.
- [20] 杨浩,姚顺,杨黎晖,等. 基于滑动平均滤波的三相并网逆变器多谐振控制器[J]. 高电压技术,2023,49(6):2579-2588.
YANG Hao,YAO Shun,YANG Lihui,et al. Multi resonance controller of three-phase grid-connected inverter based on moving average filter[J]. High Voltage Engineering,2023,49(6):2579-2588.
- [21] 江周鹏,郝武帮,李琰. 多功能光伏并网逆变器优化控制策略[J/OL]. 电源学报,1-13[2024-10-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230816.1737.002.html>.
JIANG Zhoupeng,HAO Wubang,LI Yan. Optimal control strategy for multifunctional grid-connected photovoltaic inverter[J/OL]. Journal of Power Supply,1-13[2024-10-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230816.1737.002.html>.
- [22] 陈磊,王聪,董增波,等. 多功能并网逆变器的预测-等效滑模控制策略[J]. 科学技术与工程,2024,24(12):4990-4997.
CHEN Lei,WANG Cong,DONG Zengbo,et al. MPC-SMC-based control scheme of the MFGTI[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(12):4990-4997.
- [23] LIN H Y,GUO X,CHEN D D,et al. A frequency adaptive repetitive control for active power filter with 380 V/75 A SiC-inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2022,58(4):5469-5479.
- [24] 刘辉,于思奇,孙大卫,等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J/OL]. 中国电机工程学报:1-16[2024-10-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240509.1704.007.html>.
LIU Hui,YU Siqu,SUN Dawei,et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J/OL]. Proceedings of the CSEE:1-16[2024-10-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240509.1704.007.html>.
- [25] 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.
- [26] 许洁翊,刘威,刘树,等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术,2022,46(9):3586-3595.
XU Jieyi,LIU Wei,LIU Shu,et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology,2022,46(9):3586-3595.
- [27] 王泽昆,程鹏,贾利民. 单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(10):118-127.
WANG Zekun,CHENG Peng,JIA Limin. Transient stability analysis of single voltage loop grid-forming inverter[J]. Power System Protection and Control,2024,52(10):118-127.
- [28] 郑云平,焦春雷,亚夏尔·吐尔洪,等. 基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J]. 高压电器,2023,59(7):65-74.
ZHENG Yunping,JIAO Chunlei,YAXAR·Turgun,et al. Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced generation[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(7):65-74.
- [29] 罗澍忻,韩应生,余浩,等. 构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J]. 南方电网技术,2023,17(5):39-48.
LUO Shuxin,HAN Yingsheng,YU Hao,et al. Application of grid-forming control in improving the oscillation stability of power systems with high proportion renewable energy integration[J]. Southern Power System Technology,2023,17(5):39-48.
- [30] 马覃峰,安甦,刘明顺,等. 光储系统电网侧故障下 VSC 变流器的跟网-构网型控制方法[J]. 广东电力,2023,36(12):47-56.
MA Qinfeng,AN Su,LIU Mingshun,et al. Control methods of VSC converters for grid-following/forming operation under grid-side faults in PV energy storage systems[J]. Guangdong Electric Power,2023,36(12):47-56.
- [31] 邱晓燕,闫幸,周毅,等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型与跟网型逆变器主导微网系统无功功率均分控制策略[J]. 电力建设,2024,45(1):22-32.
QIU Xiaoyan,YAN Xing,ZHOU Yi,et al. Reactive power sharing control strategy for microgrids dominated by grid-forming and grid-following inverters based on adaptive virtual impedance[J]. Electric Power Construction,2024,45(1):22-32.
- [32] 阮亮,王杨,肖先勇,等. 跟网型和构网型变流器动态交互特性分析[J]. 智慧电力,2024,52(7):103-110.
RUAN Liang,WANG Yang,XIAO Xianyong,et al. Dynamic interaction control characteristic analysis of grid-following and grid-forming inverters[J]. Smart Power,2024,52(7):103-110.
- [33] 陈燕东,裴欣欣,符有泽,等. 构网型逆变器与 SVG 并联系统无功功率协调控制策略[J]. 湖南电力,2024,44(2):112-121.
CHEN Yandong,PEI Xinxin,FU Youze,et al. Coordinated control strategy of reactive power of grid-forming inverter and SVG parallel system[J]. Hunan Electric Power,2024,44(2):112-121.

- [34] KAMALA S, GORLA N B Y, PANDA S K. Small-signal stability improvement of microgrid with battery energy storage system based on real-time grid impedance measurement [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58 (2): 2537-2546.
- [35] 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.

作者简介:



梁晓锐

梁晓锐(1994),男,博士,高级工程师,从事电力系统电能质量治理、新型储能及碳中和相关工作(E-mail: xrliang@mail.tsinghua.edu.cn);

罗宇航(2001),男,硕士在读,研究方向为并网变流器稳定性分析及电能质量治理;

张华赢(1981),男,硕士,教授级高级工程师,从事电能质量监测与治理相关工作。

A cooperative control strategy for power quality based on parallel grid-connected converters

LIANG Xiaorui¹, LUO Yuhang², ZHANG Huaying¹, TU Chunming², LIU Huicong¹, ZHENG Yuting²

(1. New Smart City High Quality Power Supply Joint Laboratory of CSG, Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518020, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Power quality control based on grid-connected converter can effectively utilize the surplus capacity of the converter and improves the benefits. However, existing methods tend to only consider grid-following (GFL) control and fail to fully utilize the control potential of multiple converters. In this paper, a cooperative control strategy for harmonic compensation and voltage drop suppression is proposed based on a parallel system of GFL and grid-forming (GFM) converters. Firstly, the basic control principle and mathematical model of grid-connected converter are introduced. Secondly, to compensate the harmonics at the point of common coupling (PCC), a harmonic sub-compensation method is proposed. This approach can improve the flexibility of harmonic compensation and reasonably apportion harmonic between grid-connected converter of different capacities. To support the PCC voltage, the parallel system can operate in three conditions: normal operation condition, condition of GFL support voltage independently and co-supported operating condition. Through compensation capacity calculation and reactive power allocation, the voltage at the PCC can maintain near the rated voltage. Finally, the feasibility and superiority of the proposed strategy are verified through simulations.

Keywords: grid-connected converter; grid-following (GFL); grid-forming (GFM); quasi-resonant control; harmonic control; voltage support; power quality

(编辑 陆海霞)