DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.70 **中图分类号**：TM461 **文献标志码**：A

电网不平衡下抑制 Swiss 整流器电流畸变的协调控制方法

姜卫东(中国电源学会会员)，刘欣然(中国电源学会学生会员)，钟 敏，
刘圣宇(中国电源学会学生会员)，杨 柳，徐星侯
(合肥工业大学电气与自动化工程学院，合肥 230009)

摘要：Swiss 整流器因其高效、控制简单等优势在电动汽车充电领域有着良好的发展前景。在电网不平衡的状态下，采用传统控制方法会导致 Swiss 整流器的直流侧产生偶次谐波，交流侧产生奇次谐波，影响系统运行。因此，介绍了 2 种 Swiss 整流器在电网不平衡条件下的控制方法：输出电压恒定控制 COVC(constant output voltage control)和电流正弦对称控制 SSCC(sinusoidal and symmetrical current control)。若采用 COVC，直流侧电压能保持稳定，但输入电流中会存在负序电流，使 Swiss 整流器的电网电压和电流出现相位差；由于拓扑结构的限制，这种相位差会导致电网电流畸变。SSCC 可以保持电流对称正弦，但直流侧电压会有较大波动。针对以上问题，提出了 1 种抑制电流畸变的协调控制方法 SCDC(suppressing current distortion control)，该控制方法可以实现在电网电压全范围跌落下的输入电流正弦，并保持有功功率波动最小。最后，通过实验验证了 SCDC 方法的有效性。

关键词：Swiss 整流器；电网不平衡；电流畸变

Coordinated Control Method for Suppressing Current Distortion of Swiss Rectifier under Unbalanced Power Grid

JIANG Weidong, *Member*, *CPSS*, LIU Xinran, *Student Member*, *CPSS*, ZHONG Min,
LIU Shengyu, *Student Member*, *CPSS*, YANG Liu, XU Xingyu
(School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Owing to their advantages such as high efficiency and simple control, Swiss rectifiers show promise in the field of electric vehicle charging. Under conditions of unbalanced power grid, the use of traditional control methods will lead to the generation of even-order harmonics on the DC side and odd-order harmonics on the AC side of a Swiss rectifier, thereby affecting the system operation. On the basis, two control methods for the Swiss rectifier under unbalanced power grid conditions are introduced, i.e., constant output voltage control (COVC) and sinusoidal and symmetrical current control (SSCC). With COVC, the DC voltage remains stable at the cost of negative-sequence current emerging in the input current, which results in a phase difference between the grid voltage and current of the Swiss rectifier. Due to constraints on the topology, this phase difference may lead to grid current distortion. SSCC ensures a symmetrical and sinusoidal current, but significant fluctuations in the DC voltage may exist. To solve these problems, a coordinated control method of suppressing current distortion control (SCDC) is proposed, which can realize sinusoidal input current throughout the entire grid voltage drop range while minimizing the fluctuations of active power. The effectiveness of the SCDC method was verified by experimental results.

Keywords: Swiss rectifier; unbalanced power grid; current distortion

收稿日期：2024-05-14；**修回日期**：2024-06-18，2024-07-03，2024-07-16；**录用日期**：2024-07-20；**网络首发日期**：2024-08-09
基金项目：国家自然科学基金面上项目(52077050)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52077050

Swiss 整流器作为 1 种新型的单向降压型三相整流器，具有输出电压范围宽、效率高、电流谐波含量低等优势[1]，在大功率电动汽车电池充电系统、直流配电系统、高功率照明系统等场景下均有广泛的应用[2-3]。

针对 Swiss 整流器的控制方法研究大多集中在电网平衡的状态下。电网平衡时，Swiss 整流器最常用的控制方法是双闭环比例积分 PI(proportional integral)控制[4]，双闭环 PI 控制方法设计简单，但动态性能较差，在一些需要快速精确响应的系统中适用性不强[5]。文献[6]在传统 PI 控制的基础上，提出了 1 种新型模糊 PI 控制，利用模糊集理论实时修正 PI 参数，增强了系统的快速性和鲁棒性。但是，Swiss 整流器在实际应用时，电网并非一直处于平衡状态[7-9]。在电网不平衡的情况下，若继续采用平衡状态下的控制方法，则会在 Swiss 整流器的直流侧产生偶次谐波，交流侧产生奇次谐波，导致 Swiss 整流器的性能下降[10-12]。因此，研究电网不平衡下的控制方法很有必要。文献[13]提出了 1 种基于虚拟阻抗的电网不平衡控制策略，用虚拟矢量来构造输入电流参考值，不需要锁相环和相序分量提取，控制简单，易于实现。

目前，对于 Swiss 整流器的研究更多集中在对拓扑的改进上[14-16]。在基础拓扑下进行的研究，又更多集中在解决 Swiss 整流器在扇区边界的电流畸变问题上[17-18]。而由于 Swiss 整流器拓扑结构的限制，在电网电压与电流出现相位差时会引起电流畸变，针对该畸变问题的研究相对较少。文献[19]介绍了电网平衡状态下电流相移角度的限制，但并未提出电流发生畸变的解决方法。而在电网不平衡的情况下，由于系统中会产生负序电流，电网电压与电流的相位会发生偏差，这时出现的电流畸变问题几乎没有在任何研究中讨论过。但实际应用中电网不平衡情况常有发生，电网跌落后引起的电流畸变问题也会导致电流谐波含量增大，可能出现过热、绝缘老化等危害。因此，针对电网不平衡下的电流畸变问题提出解决方案很有必要。

针对 Swiss 整流器在电网不平衡下的运行，文献[20]提出了 2 种基本控制方法：输出电压恒定控制 COVC(constant output voltage control)和电流正弦对称控制 SSCC(sinusoidal and symmetrical current control)。COVC 保持直流侧电压稳定，但输入电流中会存在负序电流，使 Swiss 整流器的电网电压和电流出现相位差，导致输入电流畸变。SSCC 保持电流正弦对称，但直流侧电压会有较大波动。本文对 Swiss 整流器在电网不平衡下的电流畸变问题进行了分析，并对 COVC 控制进行了改进，提出了 1 种电网不平衡下抑制 Swiss 整流器电流畸变的协调控制方法 SCDC(suppressing current distortion control)，能够在抑制电流畸变的同时保持有功功率波动最小。

1　Swiss 整流器的基本原理

Swiss 整流器的拓扑如图 1 所示。图中：二极管 D_1~D_6 构成三相不控整流桥；S_{ya}、S_{yb}、S_{yc} 均为 2 个反向串联的 IGBT 构成的双向开关管，三相构成三次谐波注入网络；S_p、S_n 为直流侧的 2 个高频开关管，与 D_p、D_n、L_p、L_n、C_{dc} 共同组成降压斩波电路；L_{ga}、L_{gb}、L_{gc}、C_a、C_b、C_c 组成交流侧 LC 滤波系统，用于将机侧的断续电流滤为正弦的交流电流；R_L 为直流侧负载。三相不控整流桥中，连接到正母线的 3 个二极管 D_1、D_2、D_3 中，仅有连接到电网电压瞬时值最大相的二极管导通；而连接到负母线的 3 个二极管 D_4、D_5、D_6 中，仅有连接到电网电压瞬时值最小相的二极管导通。三次谐波注入网络的 3 个双向开关管为低频开关管，控制方法

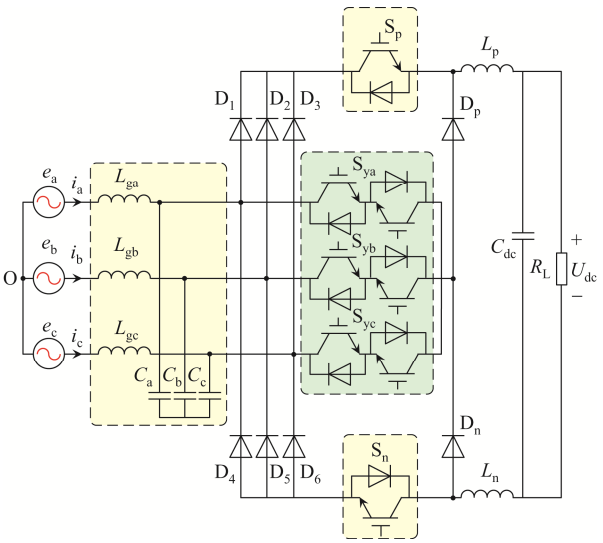


图 1　Swiss 整流器拓扑

Fig.1 Topology of Swiss rectifier

为电网电压瞬时值中间相对应双向开关管导通。高频开关管 S_p、S_n 的作用是调制电网电压瞬时值中最大相和最小相的电流。因为三相电网电流之和为 0，且电网电压中间相的电流通过三次谐波注入网络自然流通，所以只要电网电压最大相和最小相的电流按照给定占空比调制，中间相电流自然满足控制目标，从而实现三相电网电流正弦。

2 电网不平衡下 Swiss 整流器的控制方法

2.1 电网不平衡下的功率分析

根据瞬时功率理论，在 dq 坐标系下的有功功率和无功功率可以表示为

$$\begin{cases} p = p_0 + p_1\cos(\theta_+ + \theta_-) + p_2\sin(\theta_+ + \theta_-) \\ q = q_0 + q_1\cos(\theta_+ + \theta_-) + q_2\sin(\theta_+ + \theta_-) \end{cases} \tag{1}$$

式中：p_0、q_0 分别为有功功率和无功功率的平均值；p_1、q_1 分别为有功功率和无功功率的余弦波动量；p_2、q_2 分别为有功功率和无功功率的正弦波动量；θ_+、θ_- 分别为电网电压正、负序相角。根据电网电压定向原则，且仅考虑 Swiss 整流器工作在单位功率因数下的情况，则有

$$\begin{cases} p_0 = e_d^+ i_d^+ + e_d^- i_d^-, \quad p_1 = e_d^+ i_d^- + e_d^- i_d^+, \quad p_2 = 0 \\ q_0 = 0, \quad q_1 = 0, \quad q_2 = e_d^+ i_d^- - e_d^- i_d^+ \end{cases} \tag{2}$$

式中：e_d^+、e_d^- 分别为电网电压正、负序分量；i_d^+、i_d^- 分别为电网电流正、负序分量。由式(1)可得有功功率的波动幅值为

$$\tilde{p} = \sqrt{p_1^2 + p_2^2} \tag{3}$$

为方便后续的分析，本文中的变量采用标幺值，设基值为电网平衡时的标准值，上标“*”为对应变量的标幺值，则部分变量的定义为

$$\begin{cases} i_d^{+*} = i_d^+ / i_{dq,\max},\ i_d^{-*} = i_d^- / i_{dq,\max} \\ e_d^{+*} = e_d^+ / e_{d\mathrm{N}},\ e_d^{-*} = e_d^- / e_{d\mathrm{N}} \\ e_{d\mathrm{N}} = \sqrt{1.5}e_{\max},\ i_{dq,\max} = \sqrt{1.5}i_{\max} \\ e_{\mathrm{a}}^* = e_{\mathrm{a}} / e_{\max},\ e_{\mathrm{b}}^* = e_{\mathrm{b}} / e_{\max},\ e_{\mathrm{c}}^* = e_{\mathrm{c}} / e_{\max} \\ i_{\mathrm{a}}^* = i_{\mathrm{a}} / i_{\max},\ i_{\mathrm{b}}^* = i_{\mathrm{b}} / i_{\max},\ i_{\mathrm{c}}^* = i_{\mathrm{c}} / i_{\max} \\ S_{\max} = i_{dq,\max} e_{d\mathrm{N}},\ p_0^* = p_0 / S_{\max} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$i_{dq,\max}$ 为 dq 轴电流给定的最大值；$e_{d\mathrm{N}}$ 为电网电压 d 轴分量额定值；$e_{\max}$ 为电网电压最大值；$i_{\max}$ 为电网电流最大值；e_{a}、e_{b}、e_{c} 为三相电网电压；i_{a}、i_{b}、i_{c} 为三相电网电流；$S_{\max}$ 为视在功率最大值。

本文讨论的电网不平衡情况为电网幅值两相跌落，假设 A、B 两相跌落，则三相电网电压可以表示为

$$\begin{cases} e_{\mathrm{a}}^* = a\cos(\omega t) \\ e_{\mathrm{b}}^* = b\cos(\omega t - 2\pi/3) \\ e_{\mathrm{c}}^* = \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \tag{5}$$

式中：a、b 分别为电网电压 A 相、B 相跌落后的幅值；ω 为电网电压角频率。再将三相电网电压变换至 dq 坐标系下，得

$$\begin{cases} e_d^{+*} = \sqrt{1/6}(a + b + 1) \\ e_d^{-*} = \sqrt{1/6}\sqrt{a^2 + b^2 - ab - a - b + 1} \end{cases} \tag{6}$$

2.2 输出电压恒定控制 COVC

在不平衡电网下，对于 Swiss 整流器来说，一般要求直流侧母线电压稳定，即有功功率不波动，这种控制方法称为 COVC。令 p_0^* 为给定值，$p_1^* = p_2^* = 0$，可得 COVC 的 d 轴电流给定值为

$$\begin{cases} i_d^{+*} = \dfrac{e_d^{+*} p_0^*}{(e_d^{+*})^2 - (e_d^{-*})^2} \\ i_d^{-*} = -\dfrac{e_d^{-*} p_0^*}{(e_d^{+*})^2 - (e_d^{-*})^2} \end{cases} \tag{7}$$

其 q 轴电流给定为 0。设 p_0^*=1，将式(6)代入式(7)可得

$$\begin{cases} i_d^{+*} = \sqrt{2/3}\dfrac{a + b + 1}{a + b + ab} \\ i_d^{-*} = \dfrac{\sqrt{a^2 + b^2 - ab - a - b + 1}}{a + b + ab} \end{cases} \tag{8}$$

结合式(2)、式(3)和式(7)可得 COVC 的有功功率波动幅值为

$$\tilde{p}_{\mathrm{COVC}} = 0 \tag{9}$$

2.3 电流正弦对称控制 SSCC

Swiss 整流器若需要三相电网电流正弦对称，则需要消除负序电流，这种控制方法称为 SSCC。

令 p_0^*为给定值，$i_d^{-*}=0$，可得 SSCC 的 d 轴电流给定值为

$$\begin{cases} i_d^{+*}=p_0^*/e_d^{+*} \\ i_d^{-*}=0 \end{cases} \tag{10}$$

其 q 轴电流给定为 0。设 p_0^*=1，将式(6)代入式(10)得

$$\begin{cases} i_d^{+*}=\sqrt{6}/(a+b+1) \\ i_d^{-*}=0 \end{cases} \tag{11}$$

结合式(2)、式(3)、式(6)和式(11)可得 SSCC 的有功功率波动幅值为

$$\tilde{p}_{\mathrm{SSCC}}=\frac{\sqrt{a^2+b^2-ab-a-b+1}}{a+b+1} \tag{12}$$

3　电网不平衡下 Swiss 整流器的电流畸变

3.1　电网不平衡下的电流畸变问题

由 Swiss 整流器的拓扑结构可以看出，由于前级的不控整流桥作用，电网电压最大相对应的正母线二极管导通，导致该相无法流过负电流，若此时给定电流为负，则会引起电流畸变；电网电压最小相同理。若在电网不平衡的情况下采用 COVC 方法，则会产生负序电流，导致三相电流不对称，电网电压与电流之间出现相位差。电网电压跌落程度越深，相位差越大，在相位差较大时会出现电流畸变的问题。

图 2 为电网电压 A 相跌落至 80%，B 相跌落至 20%时，采用 COVC 方法的波形。可以看出，在 t_1 时刻，A 相给定电流由正向负过零，但此时 A 相电网电压仍为最大相，直到 t_2 时刻才换为中间相。该情况导致在 t_1~t_2 的时间内，A 相电网电压为最大相，给定电流小于 0，A 相电流发生畸变。具体畸变特征分析如下：在 t_1 时刻，给定电流小于 0，A 相对应二极管 D_1 无法流过负电流，实际电流 i_a 经过 LC 电路续流，续流回路如图 3 所示。电感电流 i_a 维持在 t_1 时刻的值不变，形成 1 个平台。此时 B 相电网电压为中间相，B 相电流经由三次谐波注入网络自然流通，由于 A 相电流不变，而 C 相电流经由开关管 S_n 正常调制，为保持三相电流之和为 0，B 相电流也会发生畸变。

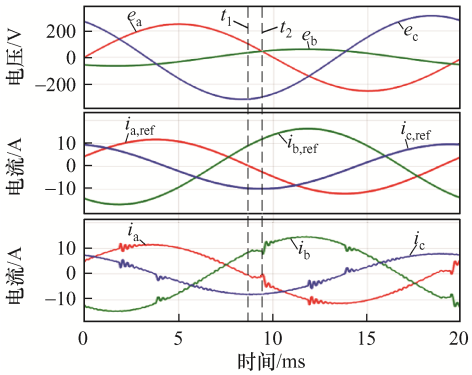


图 2　电网不平衡下的电流畸变现象

Fig. 2 Current distortion phenomenon under unbalanced power grid

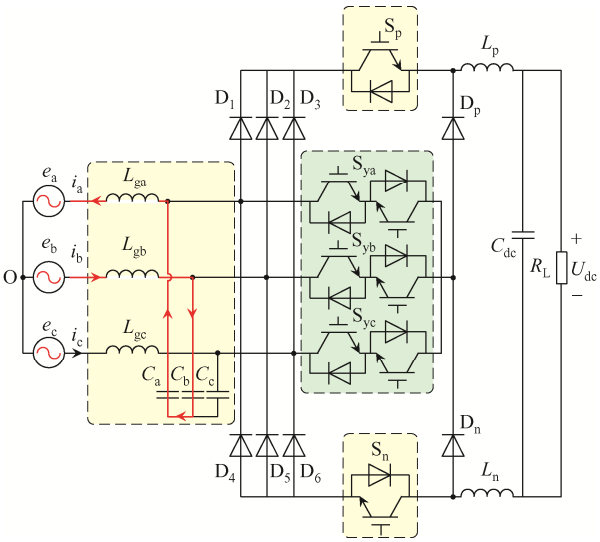


图 3　A 相电流续流回路

Fig. 3 Freewheeling circuit of phase-A current

在 t_2 时刻，电网电压换相，A 相换为中间相，B 相换为最大相。B 相电流经上开关管 S_p 调制，在 t_2 时刻发生阶跃开始跟随给定。此时 A 相电流自然流通，为保持三相电流之和为 0，A 相电流在 t_2 时刻也发生阶跃。

因此，在电网不平衡的情况下，为保证电流不发生畸变，需要满足条件①：在电网电压正半周换相点处，电网电压最大相对应电流大于等于 0；在电网电压负半周换相点处，电网电压最小相对应电流小于等于 0，即

$$\begin{cases} i_{\max}(\theta_+) \geqslant 0 \\ i_{\min}(\theta_-) \leqslant 0 \end{cases} \tag{13}$$

式中：θ_+为电网电压正半周换相角；θ_-为电网电压负半周换相角。

3.2 COVC 的跌落限制

根据 3.1 节的分析，在电网电压不平衡时，若采用 COVC 方法，当电网电压跌落到一定程度时，电流就会发生畸变。为了使 COVC 满足条件①，需要对电网电压的两相跌落程度进行限制。

假设电网电压跌落恒定，则三相电网电压在正负半周的交点是对称的，以正半周为例进行分析。由式(5)可得，三相电网电压在正半周 3 个交点处的相位为

$$\begin{cases} \theta_{e,\mathrm{ac}} = \arctan\left(-\dfrac{2a+1}{\sqrt{3}}\right) \\ \theta_{e,\mathrm{ab}} = \arctan\left(\dfrac{2a+b}{\sqrt{3}b}\right) \\ \theta_{e,\mathrm{bc}} = \arctan\left(\dfrac{b-1}{\sqrt{3}(b+1)}\right)+\pi \end{cases} \tag{14}$$

当 Swiss 整流器采用 COVC 控制方法时，d 轴电流给定值如式(8)所示，将式(8)通过反 Park 和 Clark 变换转换到 abc 坐标系下，得

$$\begin{cases} i_{\mathrm{a}}^* = \dfrac{b+1}{a+b+ab}\cos(\omega t) - \dfrac{\sqrt{3}}{3}\dfrac{1-b}{a+b+ab}\sin(\omega t) \\ i_{\mathrm{b}}^* = \dfrac{-1}{a+b+ab}\cos(\omega t) + \dfrac{\sqrt{3}}{3}\dfrac{2a+1}{a+b+ab}\sin(\omega t) \\ i_{\mathrm{c}}^* = \dfrac{-b}{a+b+ab}\cos(\omega t) - \dfrac{\sqrt{3}}{3}\dfrac{2a+b}{a+b+ab}\sin(\omega t) \end{cases} \tag{15}$$

令三相电流分别在该相电压与另两相电压交点处大于等于 0，可得

$$\begin{cases} i_{\mathrm{a}}^*(\theta_{e,\mathrm{ab}}) \geqslant 0, \quad i_{\mathrm{a}}^*(\theta_{e,\mathrm{ac}}) \geqslant 0 \\ i_{\mathrm{b}}^*(\theta_{e,\mathrm{bc}}) \geqslant 0, \quad i_{\mathrm{b}}^*(\theta_{e,\mathrm{ab}}) \geqslant 0 \\ i_{\mathrm{c}}^*(\theta_{e,\mathrm{ac}}) \geqslant 0, \quad i_{\mathrm{c}}^*(\theta_{e,\mathrm{bc}}) \geqslant 0 \end{cases} \tag{16}$$

式(16)中只有 3 个独立的式子，即

$$\begin{cases} i_{\mathrm{a}}^*(\theta_{e,\mathrm{ab}}) \geqslant 0 \\ i_{\mathrm{b}}^*(\theta_{e,\mathrm{bc}}) \geqslant 0 \\ i_{\mathrm{c}}^*(\theta_{e,\mathrm{ac}}) \geqslant 0 \end{cases} \tag{17}$$

根据式(17)中的 3 个式子，可以绘制出在采用 COVC 时，为使电流不发生畸变的电网电压两相跌落限制范围如图 4 所示。将不发生电流畸变的区域称为可行区域，在非可行区域内，COVC 方法会发生电流畸变。

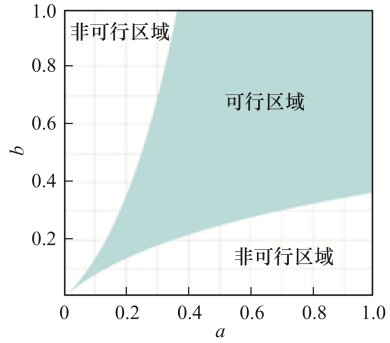


图 4 COVC 控制下的两相跌落限制范围

Fig. 4 Limitation range of two-phase voltage drop in power grid under COVC

4 抑制电流畸变的新型控制方法

由第 3 节分析可知，采用 COVC 方法时，由于需要控制直流侧电压稳定，系统中会产生负序电流，导致三相电流发生相移，在电网电压跌落值在非可行区域内时会出现电流畸变的问题。若采用 SSCC 方法，则系统中无负序电流，三相电网电流始终与电压同相位，不会出现电流畸变问题，但直流侧电压会产生较大波动。因此，本文提出 1 种抑制电流畸变的协调控制方法，称为 SCDC：降低 COVC 中的负序电流给定，从而减小电压与电流的相位差，抑制电流畸变。

设 COVC 方法下的 d 轴负序电流给定为 i_d^{-*}，SCDC 方法下的 d 轴负序电流给定减小为 ki_d^{-*}($0 \leqslant k \leqslant 1$)，保持系统中的有功功率不变，即 $p_0^*=1$，由式(2)可算出 SCDC 方法下的 d 轴正序电流给定为

$$i_d^{+*} = \frac{1-ke_d^{-*}i_d^{-*}}{e_d^{+*}} \tag{18}$$

求解式(18)可得 SCDC 方法下的 d 轴电流给定为

$$\begin{cases} i_d^{+*} = \dfrac{\sqrt{6}(a+b+ab)-\sqrt{2/3}k(a^2+b^2-ab-a-b+1)}{(a+b+1)(a+b+ab)} \\ i_d^{-*} = -k\sqrt{\dfrac{2}{3}}\dfrac{\sqrt{a^2+b^2-ab-a-b+1}}{a+b+ab} \end{cases} \tag{19}$$

有功功率的波动幅值为

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{\mathrm{SCDC}} &= (1-k)\frac{\sqrt{a^2+b^2-ab-a-b+1}}{a+b+1} \\ &= (1-k)\tilde{p}_{\mathrm{SSCC}} \end{aligned} \tag{20}$$

可以看出，SCDC 方法下的有功功率的波动幅值小于 SSCC 方法下的波动幅值。

由以上分析可知，SCDC 方法下的负序电流是 COVC 方法下的 k 倍。通过减小 k 值可以降低三相电流中的负序电流量，减小电压与电流之间的相位差，从而使电流不发生畸变。当电网电压跌落后的幅值 a、b 在图(4)中的可行区域内时，k=1，SCDC 等同于 COVC；当 k=0 时，负序电流减小为 0，SCDC 等同于 SSCC。

减小 k 值可以抑制电流畸变，但 k 值不能无限减小，由式(20)可以看出，SCDC 方法下的有功功率波动幅值随 k 的减小而增大。因此，需要找到不同跌落程度下最合适的 k 值，使电流不发生畸变，同时保证有功功率波动幅值最小。

将式(19)进行反 Park 和 Clark 变换，可得 SCDC 在 abc 坐标系下的电流给定为

$$\begin{cases} i_{\mathrm{a}}^* = \dfrac{2f_1-2f_2/3-2f_3/3}{f_1f_5}\cos(\omega t) - \dfrac{\sqrt{1/3}f_4}{f_1}\sin(\omega t) \\ i_{\mathrm{b}}^* = -\dfrac{f_1-f_2/3-f_3/3+f_4/2}{f_1f_5}\cos(\omega t) + \dfrac{\sqrt{3}f_1-\sqrt{1/3}f_2+\sqrt{1/3}f_3+\sqrt{3}/6\,f_4}{f_1f_5}\sin(\omega t) \\ i_{\mathrm{c}}^* = \dfrac{-f_1+f_2/3+f_3/3_3+f_4/2}{f_1f_5}\cos(\omega t) - \dfrac{\sqrt{3}f_1-\sqrt{1/3}f_2+\sqrt{1/3}f_3-\sqrt{3}/6\,f_4}{f_1f_5}\sin(\omega t) \end{cases} \tag{21}$$

式中：$f_1 \sim f_5$ 为包含 a、b 的表达式；$f_1 = a+b+ab$；$f_2 = k(a^2+b^2-ab-a-b+1)$；$f_3 = k[a-(b+1)/2](a+b+1)$；$f_4 = k(1-b)$；$f_5 = a+b+1$。

为了使 SCDC 满足条件①，同第 3 节的分析方法可得

$$\begin{cases} i_{\mathrm{a}}^*(\theta_{e,\mathrm{ab}}) \geqslant 0 \\ i_{\mathrm{b}}^*(\theta_{e,\mathrm{bc}}) \geqslant 0 \\ i_{\mathrm{c}}^*(\theta_{e,\mathrm{ac}}) \geqslant 0 \end{cases} \tag{22}$$

式(22)为 3 个有关 a、b、k 的不等式，对其求解可得 k 的取值范围。为使有功功率波动最小，需要在满足条件①的情况下取 k 的最大值，即令负序电流减小量最小。因此，应取条件①的临界情况，即

$$\begin{cases} i_{\max}(\theta_+) = 0 \\ i_{\min}(\theta_-) = 0 \end{cases} \tag{23}$$

将式(22)中的 3 个式子取等，得

$$\begin{cases} i_{\mathrm{a}}^*(\theta_{e,\mathrm{ab}}) = 0 \\ i_{\mathrm{b}}^*(\theta_{e,\mathrm{bc}}) = 0 \\ i_{\mathrm{c}}^*(\theta_{e,\mathrm{ac}}) = 0 \end{cases} \tag{24}$$

分别求解式(24)中的 3 个式子可以得出 3 个不同条件下 k 的取值，其中 $i_{\mathrm{b}}^*(\theta_{e,\mathrm{bc}}) = 0$ 中 k 值无解。绘制出关于 a、b、k 的 2 个曲面，如图 5 所示。图中，若在同一(a, b)点处 2 个曲面均有对应 k 值，由于式(22)中的 3 个式子均要满足，则应取较小的 k 值。这样便可以求出在每个跌落值 a、b 下对应的唯一 k 值，使得在电网跌落的全范围内实现电网电流不畸变，且有功功率波动最小。

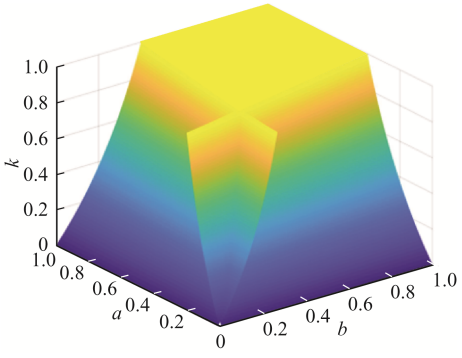


图 5　不同跌落程度下 k 的取值

Fig. 5 Values of k at different levels of drop

5 控制系统设计

图 6 为所提 Swiss 整流器 SCDC 控制方法的系统控制框图。电网电压经过 Clark 变换后进行正负序分离，再经过锁相得到正负序相角，之后进行 Park 变换得到 e_{dq}^{+}和 e_{dq}^{-}，参与给定电流计算。直流侧给定电压与实际电压作差，通过 PI 调节器输出直流给定电流，将直流侧给定电压与输出的给定电流相乘即得有功功率给定值。之后进行控制方法选择，当跌落程度在可行区域内时，SCDC 方法等效为 COVC 方法；在非可行区域内时，采用 SCDC 方法，在不同的跌落程度下选择对应的 k 值，当 k 值降为 0 时，SCDC 方法等效为 SSCC 方法。根据控制模式与有功、无功功率给定值计算得出给定 dq 轴电流，经过反 Park 和 Clark 变换得到三相给定电流。给定电流经过排序，得到的最大值与最小值分别同幅值为 i_{dc} 的载波比较得到 S_p、S_n 的 PWM 驱动信号。而三次谐波注入网络的控制方法是电网电压中间相对应的开关管导通。

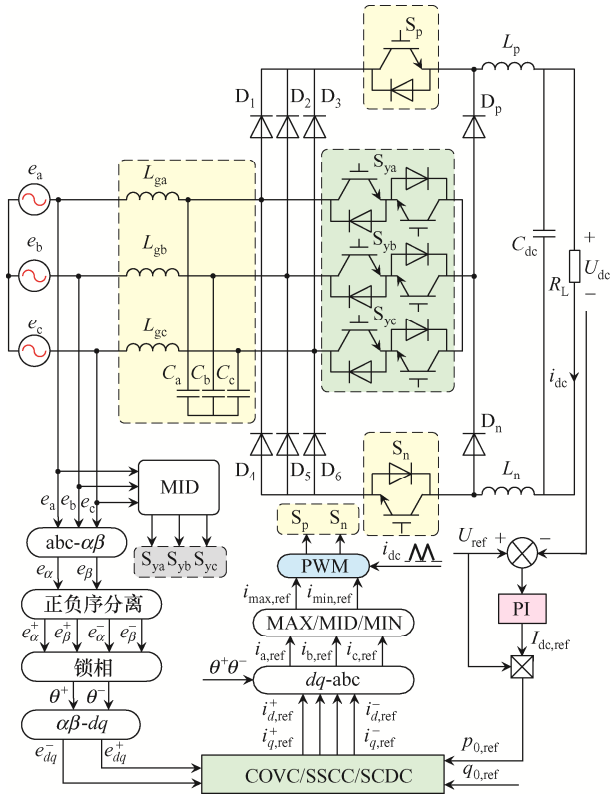


图 6 系统控制框图

Fig. 6 Block diagram of system control

6 实验结果

为了验证所提 SCDC 方法的可行性，搭建了如图 7 所示的实验平台，包括交流源(模拟三相电网电压)、Swiss 平台(开关电源、Freescale MC56F84789 型 DSP 最小系统电路、DA 转换电路、SiC MOSFET 功率器件、散热片等)、测试设备(示波器、高压差分探头、电流钳)，以及实验负载。具体实验参数见表 1。

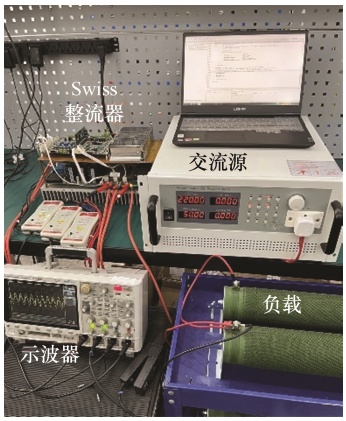


图 7 实验平台

Fig. 7 Experimental platform

表 1 Swiss 整流器实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of Swiss rectifier

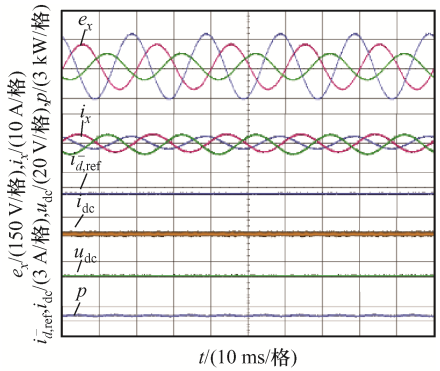
参数	数值
电网电压/V	220
直流侧电压/V	120
负载电阻/Ω	10
开关频率/kHz	30
交流侧电感/μH	150
直流侧电感/mH	1
交流侧电容/μF	6.8
直流侧电容/μF	470.0

6.1 稳态实验

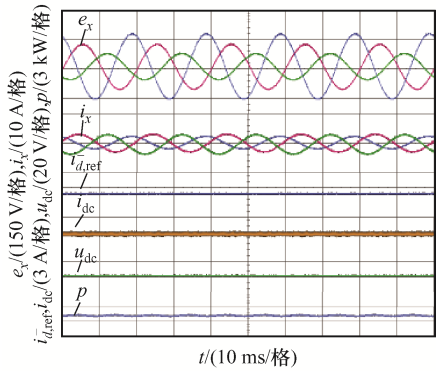
稳态实验中的电网不平衡情况为 A、B 两相电网电压幅值跌落，C 相为实际电网电压。选择了 3 种电网电压跌落情况，分别为：情况 1，a=0.7、b=0.4，在可行区域内；情况 2，a=0.8、b=0.2，在

非可行区域内；情况 3，a=0.75、b=0，为非可行区域的 1 个极端情况，B 相电网电压跌落至 0。在 3 种跌落情况下，分别采用 COVC、SSCC、SCDC 这 3 种控制方法进行稳态实验，以此来比较 3 种方法的性能。

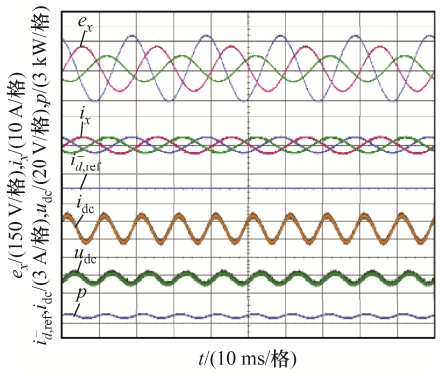
图 8 为在情况 1 时采用 3 种控制方法的实验结果，图中：Δu_{dc} 为直流侧电压波动值；Δp 为有功功率波动值；e_x、i_x(x=a、b、c)分别为三相电网电压、电流。此时采用 COVC 不会发生电流畸变，



(a)COVC(Δu_{dc}=0 V, Δp=0 W)



(b)SCDC(Δu_{dc}=0 V, Δp=0 W)



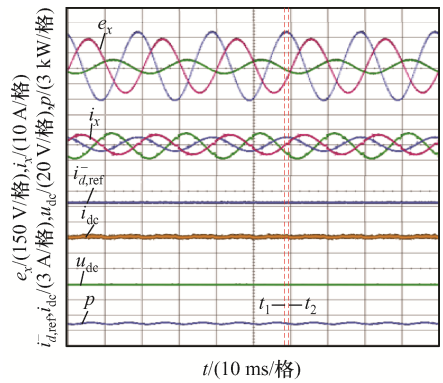
(c)SSCC(Δu_{dc}=20 V, Δp=700 W)

图 8　情况 1 时 3 种控制方法的实验结果

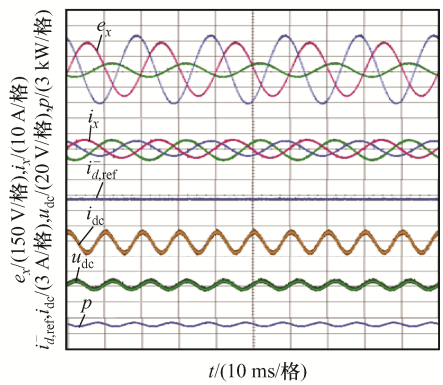
Fig. 8 Experimental results of three control methods in Case 1

k=1 时，SCDC 等同于 COVC。因此，图 8(a)与(b)中的实验结果相同，其中三相电流不对称，但不发生畸变；d 轴负序电流给定 $i_d^{-*}=-1.45$ A；直流侧电压和有功功率基本不波动。图 8(c)SSCC 的实验结果中，三相电网电流始终保持正弦对称；d 轴负序电流给定 $i_d^{-*}=0$，但直流侧电压与有功功率均波动。

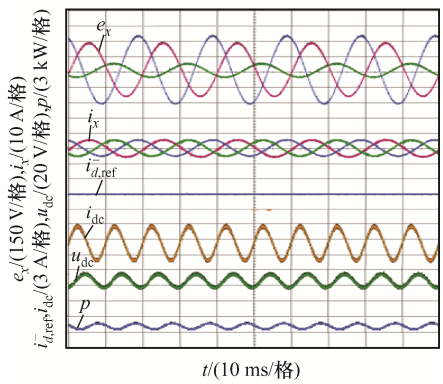
图 9 为在情况 2 时采用 3 种控制方法的实验



(a)COVC(Δu_{dc}=0 V, Δp=0 W)



(b)SCDC(Δu_{dc}=12 V, Δp=600 W)



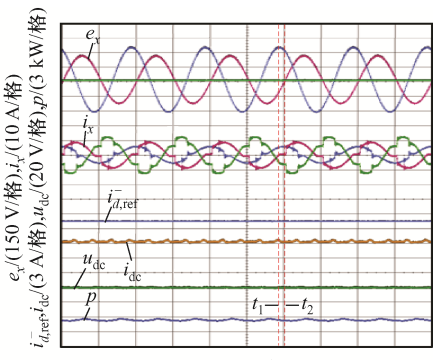
(c)SSCC(Δu_{dc}=20 V, Δp=1 000 W)

图 9　情况 2 时 3 种控制方法的实验结果

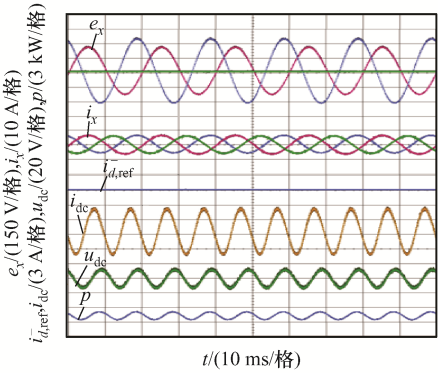
Fig. 9 Experimental results of three control methods in Case 2

结果。图 9(a)中，COVC 方法下的三相电流不对称，A 相与 B 相电流发生畸变。例如，在 t_1 时刻，A 相电流由负向正过零，但此时 A 相电网电压仍为最小相，直到 t_2 时刻才换为中间相，导致在 t_1~t_2 的时间内，A 相电流发生畸变。可以看出 A 相电流在 t_1~t_2 的时间内出现平台，在 t_2 时刻发生阶跃。d 轴负序电流给定 $i_d^-=-3.29$ A，直流侧电压和有功功率基本不波动。图 9(b)为 SCDC 方法，其中 k=0.41，可以看出三相电网电流不对称，但电流畸变已被消除；d 轴负序电流给定为 $i_d^-=-0.98$ A，为 COVC 方法下的 k 倍，符合理论分析，直流侧电压与有功功率均有波动。图 9(c)中 SSCC 的实验结果分析同图 8(c)。比较图 9(b)和(c)可得，SCDC 方法下的直流侧电压和有功功率波动幅值小于 SSCC 方法下的波动幅值。

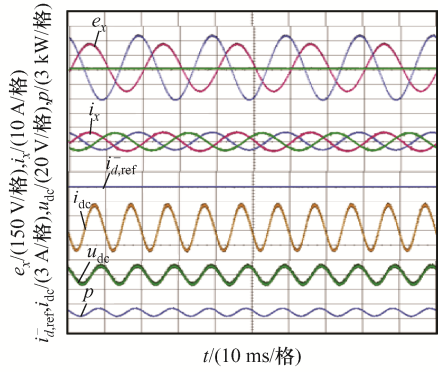
图 10 为在情况 3 时采用 3 种控制方法的实验结果。图 10(a)中，COVC 方法下的三相电流发生严重畸变。例如，在 t_1 时刻，A 相电流由负向正过零，但此时 A 相电网电压仍为最小相，直到 t_2 时刻才换为中间相，导致在 t_1~t_2 的时间内，A 相电流发生畸变。可以看出 A 相电流在 t_1~t_2 的时间内出现较长的平台，在 t_2 时刻电网电压换相点处发生较大阶跃。d 轴负序电流给定 $i_d^{-*}=-4.62$ A，直流侧电压和有功功率基本不波动。当采用 SCDC 时，由图 5 可得，若电网电压有一相跌落至 0，则 k=0，SCDC 等同于 SSCC。因此，图 10(b)与(c)中的实验结果相同，三相电流对称正弦，d 轴负序电流给定 $i_d^{-*}=0$，但直流侧电压和有功功率有很大波动。



(a)COVC(Δu_{dc}=0 V, Δp=0 W)



(b)SCDC(Δu_{dc}=28 V, Δp=1 600 W)



(c)SSCC(Δu_{dc}=20 V, Δp=1 600 W)

图 10 情况 3 时 3 种控制方法的实验结果

Fig. 10 Experimental results of three control methods in Case 3

表 2 给出了在 3 种跌落情况下，采用 COVC、SCDC、SSCC 控制方法下的电网 A 相电流总谐波失真 THD(total harmonic distortion)。可以看出，两相跌落深度在可行区域内时，3 种控制方法下的电流 THD 均较小。但在非可行区域时，COVC 方法下的电流 THD 随着跌落程度加深持续增大，超出 5%，不符合系统 THD 要求。但即使两相跌落深度在非可行区域时，SCDC 与 SSCC 的 THD 值也小于 5%，始终保持较好的 THD 性能。

表 2 不同跌落程度下 3 种控制方法的电流 THD 对比

Tab. 2 Comparison of current THD among three control methods at different levels of drop

跌落情况	COVC/%	SCDC/%	SSCC/%
a=0.7、b=0.4	3.73	3.73	3.82
a=0.8、b=0.2	6.24	3.98	3.72
a=0.75、b=0	16.59	4.01	4.01

6.2 动态实验

图 11 为电网电压突然跌落时采用 3 种控制方

法的动态实验结果。电网电压 A、B 两相在 t_0 时刻跌落至 a=0.6、b=0.2，此时 SCDC 方法的 k=0.6。可以看出，在 t_0 时刻电流会发生一定的冲击，但不超过系统保护电流，且很快恢复正常运行。直流侧电压与有功功率的冲击均较小。之后 SCDC 仍可以消除电流畸变，且保持有功功率波动小于 SSCC 方法。实验证明 SCDC 拥有良好的动态性能，可以在电网跌落瞬间快速反应，且冲击较小。

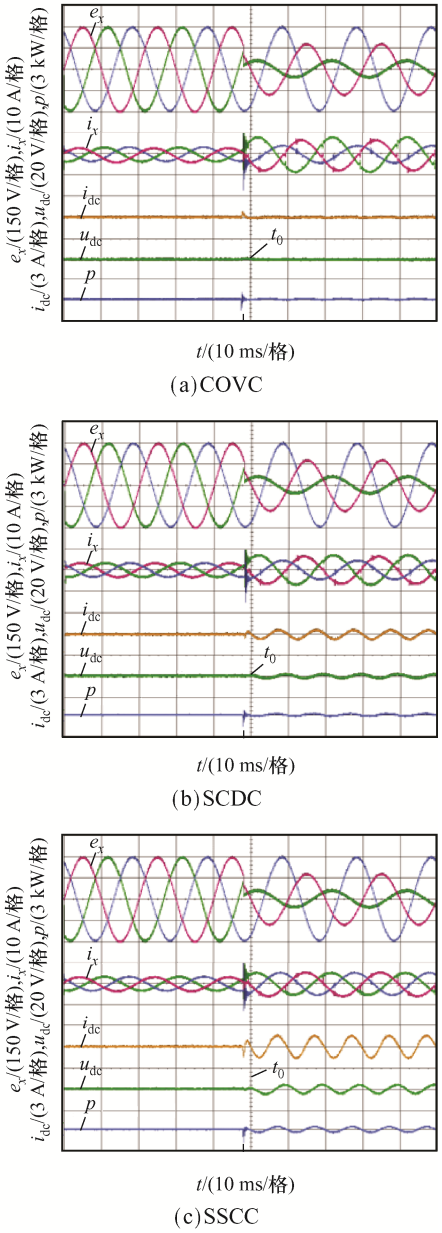


图 11　电网电压突然跌落时 3 种控制方法的动态实验结果

Fig. 11 Dynamic experimental results of three control methods under sudden drop in grid voltage

通过以上实验结果可得，在电网电压跌落程度在可行区域之外时，COVC 方法下的电流会出现畸变，并会随着跌落程度加深而越发严重，导致电流 THD 过高。SSCC 方法下的电流始终保持正弦对称，但直流侧电压和有功功率会有较大波动。本文所提 SCDC 方法是介于 COVC 和 SSCC 方法之间的 1 种协调控制方法，可以在使电流不发生畸变的同时，保持直流侧电压和有功功率的波动幅值最小。实验验证了 SCDC 方法的可行性，并证明 SCDC 相对于 2 种基本方法有着较大的优势。与 COVC 方法相比，SCDC 方法能够有效抑制电流畸变，支持更大的电网电压不平衡度；与 SSCC 方法相比，SCDC 方法能够有效降低有功功率和直流侧电压的波动。

7　结语

本文首先介绍了 Swiss 整流器的拓扑及换流路径。其次，介绍了 Swiss 整流器在电网不平衡条件下的 2 种控制方法 COVC 和 SSCC。COVC 可以保持直流侧电压稳定，但电流会出现相位偏移；SSCC 保持电流对称正弦，但直流侧电压会发生波动。然后，介绍了 COVC 方法下的电流畸变问题，分析了在电网不平衡的条件下采用 COVC 控制时电流发生畸变的原因，并计算了使电流不发生畸变的跌落限制范围。在此基础上提出了 SCDC 控制方法，可以在电网全范围跌落下实现电网电流不畸变，并且有功功率波动小于 SSCC 方法下的波动幅值。最后，通过实验验证了 SCDC 的可行性。

参考文献：

[1] Schrittwieser L, Leibl M, Haider M, et al. 99.3% efficient three-phase Buck-type all-SiC Swiss rectifier for DC distribution systems [C]// 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Tampa, FL, USA, 2017: 2173-2178.

[2] 姜燕, 李湖胜, 黄守道, 等. 基于 Swiss 整流器的新型 LC 滤波器阻尼控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(6): 120-126.

Jiang Yan, Li Husheng, Huang Shoudao, et al. New LC filter damping control strategy based on Swiss rectifier [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(6): 120-126. (in Chinese)

[3] Soeiro T B, Friedli T, Kolar J W. Swiss rectifier—a novel three-phase buck-type PFC topology for electric vehicle battery charging [C]// 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Orlando, FL, USA, 2012: 2617-2624.

[4] Kolar J W, Friedli T. The essence of three-phase PFC rectifier systems [C]// 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). Amsterdam, Netherlands, 2011: 1-27.

[5] 杨闯闯, 俞波. 基于两级结构的电动汽车直流充电桩建模[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 74-82.
Yang Chuangchuang, Yu Bo. Modeling of DC charging pile for electric vehicles based on two-stage structure [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 74-82. (in Chinese)

[6] Zhang Qiang, Dong Zhenye, Zhang Damin, et al. An improved Swiss rectifier and its nonlinear control for lower THD [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2022, 7(3): 319-327.

[7] 李俊涛, 贾科, 董学正, 等. 网侧故障下光伏直流并网系统不平衡功率快速平抑方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1340-1351.
Li Juntao, Jia Ke, Dong Xuezheng, et al. A fast method for suppressing unbalanced power in photovoltaic DC grid-connected system under grid-side faults [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1340-1351. (in Chinese)

[8] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下模块化多电平换流器的直流环流均衡策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 541-553.
Pan Zixun, Yang Xiaofeng, Zhao Rui, et al. DC circulating current balancing control of modular multilevel converter under unbalanced power grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 541-553. (in Chinese).

[9] 熊亮雳, 游力, 韩刚, 等. 基于统一不平衡/谐波电压-电流下垂的构网型变流器电能质量控制[J]. 电源学报. 2025, 23(4): 186-199.
Xiong Liangli, You Li, Han Gang, et al. Power quality control for grid-forming converters based on unified unbalanced/harmonic voltage-current droop [J]. Journal of Power Supply. 2025, 23(4): 186-199. (in Chinese)

[10] Adam A H A, Kamel S, Mansour R, et al. Direct power control of three-phase AC/DC voltage source converters under unbalanced conditions [C]// 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation, 2024: 1-6.

[11] 江友华, 陈芳, 赵乐, 等. 不平衡电网电压条件下MMC 控制策略综述[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 74-87.
Jiang Youhua, Chen Fang, Zhao Le, et al. Review of control strategies for modular multilevel converter under unbalanced grid voltage [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 74-87. (in Chinese)

[12] Liao Kai, Zhou Dehong, Shen Zewei, et al. A dual-DC-port rectifier with active power ripple suppression under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 7481-7491.

[13] 谢飞, 许建平, 郭夏, 等. 基于虚拟阻抗的三相 Buck 整流器输入不平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4456-4466.
Xie Fei, Xu Jianping, Guo Xia, et al. A control strategy based on virtual impedance for three-phase Buck rectifier under unbalanced phase-voltages [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4456-4466. (in Chinese)

[14] Zhang Binfeng, Xie Shaojun, Li Zhouyang, et al. An optimized single-stage isolated Swiss-type AC/DC converter based on single full-bridge with midpoint-clamper [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11288-11297.

[15] 李周洋, 谢少军, 张斌锋, 等. 一种改进型的基于双移相全桥的 Swiss 整流器[J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 198-206.
Li Zhouyang, Xie Shaojun, Zhang Binfeng, et al. An efficiency improved isolated Swiss rectifier based on two phase-shifted full-bridge structures [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 198-206.

[16] Wong C S, Liu Junwei, Cao Lingling, et al. A Swiss-

rectifier-based single-stage three-phase bidirectional AC-DC inductive-power-transfer converter for vehicle-to-grid applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 4152-4166.

[17] Chen Ruirui, Yao Yuan, Zhao Le, et al. Inhibiting mains current distortion for Swiss rectifier - a three-phase Buck-type harmonic current injection PFC converter [C]// 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Charlotte, NC, USA, 2015: 1850-1854.

[18] Schrittwieser L, Kolar J W, Soeiro T B. Novel Swiss rectifier modulation scheme preventing input current distortions at sector boundaries [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5771-5785.

[19] 王沛东. Vienna 和 Swiss 整流器控制方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
Wang Peidong. Study on control method of Vienna and Swiss rectifiers [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021. (in Chinese)

[20] 姜卫东, 刘圣宇, 张庆岩, 等. 一种改进的基于电网幅值跌落的 Swiss 整流器协调优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8597-8608.
Jiang Weidong, Liu Shengyu, Zhang Qingyan, et al. An improved coordination and optimization control method for Swiss rectifier based on grid amplitude drop [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8597-8608. (in Chinese)



姜卫东

作者简介：

姜卫东(1976—　)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子与电力传动，电机控制。E-mail：ahjwd@163.com。

刘欣然(2000—　)，女，中国电源学会学生会员，硕士。研究方向：PWM 整流器控制与应用。E-mail：lxr_0501@163.com。

钟敏(1999—　)，男，硕士。研究方向：PWM 整流器控制与应用。E-mail：zhongmin199905@163.com。

刘圣宇(1997—　)，男，中国电源学会学生会员，博士。研究方向：三电平变流器控制与调制。E-mail：2019170309@mail.hfut.edu.cn。

杨柳(1998—　)，女，硕士。研究方向：三电平变流器控制与调制。 E-mail：yangliu9881@163.com。

徐星俣(2000—　)，男，硕士。研究方向：三电平变流器控制与调制。E-mail：xuxingyu0417@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)