

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403055

弱电网不平衡工况下的构网型 储能控制技术研究

黄贤淼¹, 邵尹池¹, 巩宇¹, 刘迪¹, 朱学森¹, 罗家林²

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

[摘要] 弱电网内阻抗大, 在接入不平衡负载时, 无法维持自身电压的稳定, 导致电压三相不平衡、输出功率波动, 虚拟同步发电机 (VSG) 技术作为构网型控制可对弱电网电压提供支撑, 但不平衡负载接入下 VSG 技术无法维持输出电压平衡。对此, 提出一种的改进 VSG 分序解耦控制策略。首先, 分析了不平衡负载接入后导致 VSG 输出电压三相不平衡、功率波动的机理; 然后, 采用基于双同步坐标系解耦 (DDSRF), 分离出电网正、负序电压, 在 dq 旋转坐标系下采取正、负序分序控制的策略, 控制负序电压分量; 最后, 搭建了 VSG 仿真模型, 仿真结果表明所提改进 VSG 分序解耦控制技术可抑制 VSG 输出的不平衡电压。

[关键词] 构网控制; 储能; VSG; 不平衡控制

[引用本文格式] 黄贤淼, 邵尹池, 巩宇, 等. 弱电网不平衡工况下的构网型储能控制技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 59-67. HUANG Xianmiao, SHAO Yichi, GONG Yu, et al. Control technology for grid-forming energy storage under unbalanced working conditions of weak current networks[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 59-67.

Control technology for grid-forming energy storage under unbalanced working conditions of weak current networks

HUANG Xianmiao¹, SHAO Yichi¹, GONG Yu¹, LIU Di¹, ZHU Xuesen¹, LUO Jialin²

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China;
2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The impedance inside weak current network is large, and when unbalanced loads are connected, it is unable to maintain the stability of its own voltage, resulting in three-phase voltage imbalance and output power fluctuations. Virtual synchronous generator (VSG) technology, as a grid-forming control, can provide support for voltage of the weak current network. However, under the connection of unbalanced loads, the VSG technology cannot maintain output voltage balance. To solve this problem, an improved VSG sequence decoupling control strategy is proposed. Firstly, the principle of three-phase imbalance and power fluctuation in VSG output voltage caused by unbalanced load connection is investigated. Secondly, a dual synchronous coordinate system decoupling (DDSRF) is adopted to separate the positive and negative sequence voltages of the power grid, and a positive and negative sequence control strategy is employed to control the negative sequence voltage component in dq rotating coordinate system. Finally, a VSG simulation model is built and the simulation results indicate that the proposed improved VSG sequential decoupling control strategy can suppress the unbalanced voltage output of the VSGs.

Key words: grid-forming control; energy storage; VSG; unbalanced control

近年来, 可再生能源在电网中渗透率不断提升, 区域网络已经逐渐从高转动惯量、低内阻抗的强电网转化为低转动惯量、高内阻抗的弱电网^[1-3]。

高可再生能源渗透率下的电网电源与传统的同步发电机电源不同, 是通过电力电子变流器进行整流逆变的电流源, 缺乏同步发电机自身具备旋转惯性

收稿日期: 2024-03-30

基金项目: 国网冀北电力有限公司科技项目 (52018K23000G)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. (52018K23000G)

第一作者简介: 黄贤淼 (1997), 男, 工程师, 主要研究方向为储能建模技术, 2461902282@qq.com。

通信作者简介: 罗家林 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网储能控制技术, 3142849855@qq.com。

和阻尼,因此在应对电网中的干扰时,无法保持电网电压、频率的稳定性^[4-5]。弱电网在实际运行的过程中,易受到不平衡负载、相间故障等因素的影响而无法保证自身电压的对称性,使得电网断电、火灾等事故频发^[6-8]。特别是在港口、海岛、偏远山区等供电薄弱的地点,电网将长期处于孤岛运行的工况,无法保证供电区域内供电可靠性和电能质量。

大规模储能发展是可再生能源充分开发利用的最佳技术支撑^[9-12],能有效解决电网运行安全^[13]、电能质量^[14]、电力电量平衡^[15]等方面存在的突出问题。储能控制技术分为构网型和跟网型 2 种,其中构网型储能控制技术能够提供惯量支撑,显著提高电网的稳定性^[16-17],目前有学者将储能与虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制技术^[18-20]相结合,使得储能模拟同步发电机的运行特性,为电网提供惯量、阻尼支撑。但同步发电机在接入不平衡负载情况下无法维持电压三相平衡,VSG 控制也存在此问题^[21-22]。文献[23]基于二阶广义积分器(SOGI)降阶后得到降阶谐振调节器的正负序分离技术,该技术省略了对称分量法步骤,可直接进行正负序分离,运算量小,速度快,但实际计算中由于存在复数算子 j ,因此正负序分离精度仍有一定降低,且易收到谐波影响。文献[24]在 $\alpha\beta$ 坐标系下提出一种改进的比例复数积分负序电压 VSG 控制方法,并结合虚拟阻抗补偿不平衡电压压降,该方法虽然可以有效补偿不平衡电压,且比例复数积分控制具有较强的抗干扰性,但添加了虚拟阻抗后会使得变流器内阻抗增大,增加了功率的精准分配但降低了电压支撑能力,削弱了 VSG 的电压源特性。文献[25]基于交叉解耦复数滤波器 DCCF 进行平衡电流、恒定有功及无功 3 种目标下的稳定控制,但 DCCF 控制复杂,正负序分离时间较长,且不平衡电流控制无法为电网电压提供支撑,进一步加大了电压不平衡程度。

本文在 dq 坐标系下基于双同步坐标系解耦(DDSRF)技术,进行 VSG 输出电压、电流的正负序分离,并提出一种改进电压电流双闭环控制技术的方法,实现正、负序解耦控制,在正序控制环中根据功率指令及电网正序电压、电流值计算出 VSG 正序输出电压参考信息,在负序控制环中根据负序电压指令为 0 与电网负序电压、电流值计算出 VSG 负序补偿电压参考信息,最终将正、负序输出电压叠加输入 SVPWM 调制模块得到逆变器控制信号,最终达到 VSG 输出电压三相平衡的目的。

1 构网型储能控制

储能变流器是将储能内部直流电源转换成与电网交流电源相符合的重要连接元件,储能变流器个体的功能对整个电网的功能有举足轻重的影响。VSG 控制在下垂控制的基础上加入了同步发电机的旋转惯量和阻尼分量环节,因此 VSG 控制运行时可增加系统的惯量和阻尼。其实现的原理为在下垂控制中加入了同步发电机的电磁方程和机械方程,进而起到替代作用,使采用 VSG 控制的储能装置在并网运行时,能够模拟同步机组并网运行所具备的旋转惯性、阻尼特性等外特性以及调频、调压等功能。

1.1 储能 VSG 控制原理

储能 VSG 控制原理如图 1 所示。图 1 中: u_{abc} 、 i_{abc} 分别为储能变流器中点电压、储能变流器侧电感电流; $u_{c,abc}$ 、 $i_{c,abc}$ 分别为 VSG 输出电压和电流; R_f 、 L_f 为 VSG 虚拟定子绕组阻抗; R_g 、 L_g 为线路阻抗; $u_{g,abc}$ 为电网电压; P 、 Q 分别为 VSG 输出的有功功率、无功功率; P_{ref} 、 Q_{ref} 、 f_{ref} 、 V_{ref} 、 δ_{ref} 、 e_{ref} 分别为储能变流器的有功功率、无功功率、频率、电压、相角、电动势指令值。

VSG 的有功-频率控制在下垂控制的基础上,引入了同步发电机的转子方程,通过控制虚拟机械转矩的输出调节频率,采用阻尼功率来抑制功率震荡,计算公式为:

$$\begin{cases} T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} + D_p \Delta\omega \\ \Delta\omega = (\omega - \omega_g) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_m - T_e = \frac{P_m - P_e}{\omega_n} \\ P_m = P_{ref} - K_f \Delta\omega \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_m 、 T_e 分别为 VSG 虚拟机械转矩与虚拟电磁转矩; ω 、 ω_g 分别为 VSG 虚拟电角速度与电网电角速度; D_p 为阻尼系数; J 为转子转动惯量,本文设转子极对数为 1; P_m 、 P_e 分别为虚拟机械功率和虚拟电磁功率; K_f 为有功下垂比例系数。

虚拟同步发电机有功-频率控制如图 2 所示。并网运行工况下, VSG 通过建立一个虚拟电势 U_{ref} 来模拟同步发电机调节励磁电流的调节方式,控制 VSG 输出电压和无功功率。根据 VSG 的虚拟机端电压额定值与测量得到的实际输出幅值进行比较,并采用积分控制来调整输出的无功功率,无功/电压控制计算公式为:

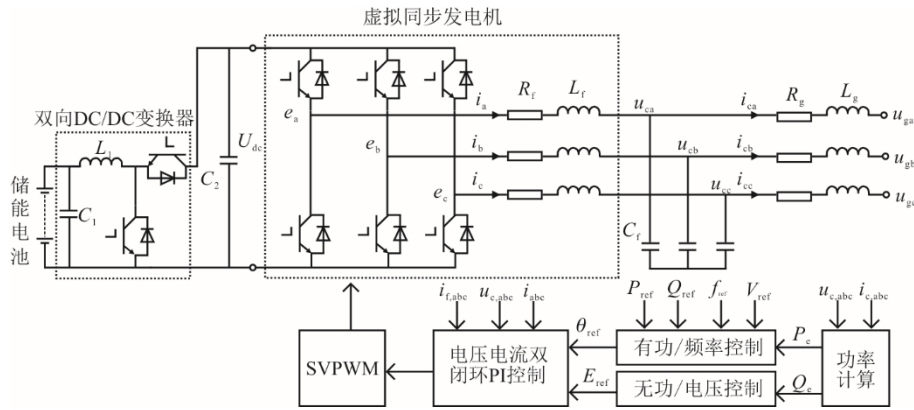


图 1 储能 VSG 控制原理
Fig.1 Principle of energy storage VSG control

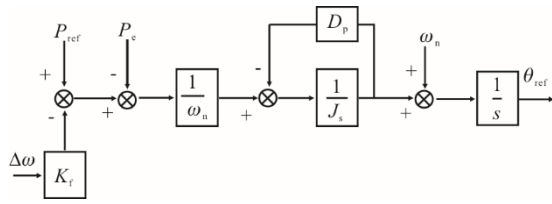


图 2 虚拟同步发电机有功功率-频率控制
Fig.2 Block diagram of active power-frequency control of VSG

$$U_{ref} = U_n + \frac{1}{K_q s} [Q_{ref} + D_q (U_{cn} - U_c) - Q_c] \quad (3)$$

式中： k_q 为积分器增益； U_{cn} 为 VSG 虚拟机端电压

额定值。

并网运行工况下的虚拟同步发电机无功功率-电压控制如图 3 所示。

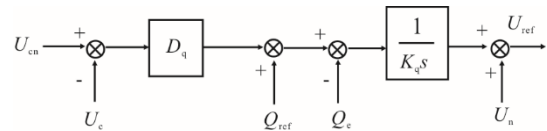


图 3 虚拟同步发电机无功功率-电压控制
Fig.3 VSG reactive power-voltage regulation chart

由此得到并网下 VSG 控制如图 4 所示。

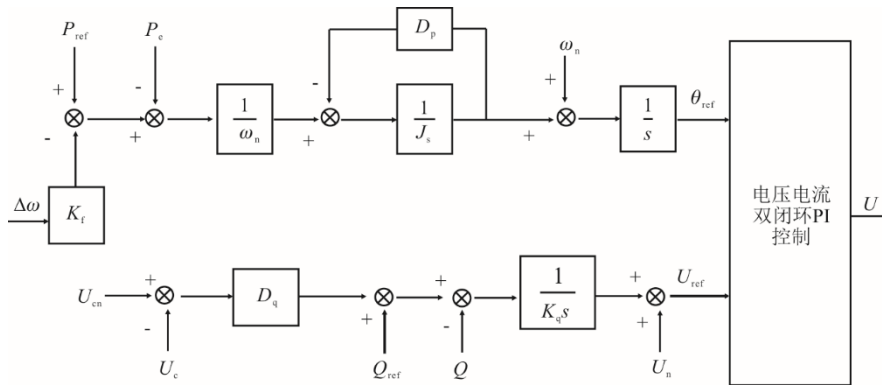


图 4 并网下 VSG 控制
Fig.4 Block diagram of VSG control under grid connection

1.2 不平衡工况下储能 VSG 输出不平衡机理

本文储能装置的接线方式为三相三线制接线，主要研究三相负载不平衡的场景，因此忽略零序分量。在实际运行中，当三相负载不平衡时，负载电压中性

点发生偏离，VSG 输出三相电压不对称，幅值不相等。

对称分量法主要用于分析电网不对称故障场景，可将一组不对称的三相量分解为正序、负序、零序三相对称的三相量。VSG 输出电压可表示为：

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_1) & \cos(\omega t + \theta_2) & \cos(\omega t + \theta_0) \\ \cos\left(\omega t + \theta_1 - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\omega t + \theta_0) \\ \cos\left(\omega t + \theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \theta_2 - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\omega t + \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^P \\ U^N \\ U^0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:上标 P 表示正序分量;上标 N 表示负序分量;上标 0 表示零序分量; θ_1 为 VSG 输出电压的正序分量的相角; θ_2 为 VSG 输出电压的负序; θ_0 为 VSG 输出电压的零序分量的相角。

本文虚拟同步发电机采用电压电流双闭环 PI 控制,因此需将不平衡电压从 abc 静止坐标系转到 dq 坐标系下分析,对式(4)进行 Park 变换可得:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = T_{abc/dq} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \cos(2\omega t + \theta_2) & 0 \\ -\sin \theta_1 & -\sin(2\omega t + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega t + \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^P \\ U^N \\ U^0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $T_{abc/dq}$ 为 Park 变换矩阵;上标 P 表示正序;上标 N 表示负序。忽略零序分量,不平衡工况下 VSG 的输出电压在 dq 坐标系中的正序、负序表达式为:

$$\begin{cases} u_d^P = \cos \theta_1 U^P \\ u_q^P = -\sin \theta_1 U^P \\ u_d^N = \cos(2\omega t + \theta_2) U^N \\ u_q^N = -\sin(2\omega t + \theta_2) U^N \end{cases} \quad (6)$$

同理,不平衡工况下 VSG 的输出电流在 dq 坐标系中的正序、负序表达式为:

$$\begin{cases} i_d^P = \cos \theta_1 I^P \\ i_q^P = -\sin \theta_1 I^P \\ i_d^N = \cos(2\omega t + \theta_2) I^N \\ i_q^N = -\sin(2\omega t + \theta_2) I^N \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)式(7)可知,虚拟同步发电机在不平衡工况下输出的电压、电流正序为常量,即直流量,输出的负序电压、电流为二倍频的波动量。

VSG 输出的瞬时功率为:

$$S = P + jQ = \left(e^{j\omega_s t} u_{dq}^P + e^{-j\omega_s t} u_{dq}^N \right) \left(e^{j\omega_s t} i_{dq}^P + e^{-j\omega_s t} i_{dq}^N \right) \quad (8)$$

式中: S 为复数功率。

根据式(8)可得到 VSG 瞬时输出的有功功率和无功功率,可表示为:

$$\begin{cases} P = \bar{p} + P_{c2} \cos(2\omega_s t) + P_{s2} \sin(2\omega_s t) \\ Q = \bar{q} + Q_{c2} \cos(2\omega_s t) + Q_{s2} \sin(2\omega_s t) \end{cases} \quad (9)$$

式中:上标“-”表示平均功率; P_{c2} 、 Q_{c2} 分别为 VSG 输出有功功率和无功功率的余弦二倍频波动幅值; P_{s2} 、 Q_{s2} 分别为 VSG 输出有功功率和无功功率的正弦二倍频分量幅值。

从式(9)可得,在不平衡负载下的 VSG 输出瞬时功率会产生二倍频分量,导致 VSG 输出的有功功率和无功功率存在二倍频振荡,该振荡由 VSG 电压、电流的正负序分量耦合产生,计算公式为:

$$\begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \\ P_{c2} \\ P_{s2} \\ Q_{c2} \\ Q_{s2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_d^P & u_q^P & u_d^N & u_q^N \\ u_q^P & -u_d^P & u_q^N & -u_d^N \\ u_d^N & u_q^N & u_d^P & u_q^P \\ u_q^N & -u_d^N & -u_q^P & u_d^P \\ u_q^N & -u_d^N & u_q^P & -u_d^P \\ -u_d^N & -u_q^N & u_d^P & u_q^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^P \\ i_q^P \\ i_d^N \\ i_q^N \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过式(10)可得,当 VSG 输出电压、电流三相平衡时,该负序分量为 0,可抑制有功功率、无功功率中的二倍频波动分量;但由于负载不平衡,电压、电流无法同时平衡,仍然存在不平衡分量,二倍频功率波动分量为负序电压、电流与正序电压、电流耦合而成,故无法消除全部功率波动分量。在该场景下,为了消除不对称电压对电网运行的影响,本文的控制目标为 VSG 输出电压三相平衡,且减少部分有功功率、无功功率的功率振荡。

2 储能 VSG 不平衡电压控制

储能 VSG 输出不平衡电压,不平衡电压输出的不平衡功率将会加重弱电网运行时的电压不对称程度,降低电网运行的稳定性。分布式可再生能源根据不平衡负载引起的不平衡电压机理,以及 DDSRF 技术的研究,利用正负序分离技术对 VSG 输出的不平衡电压进行正负序分离,并直接对负序电压进行补偿,可有效抑制 VSG 输出的负序电压,改善 VSG 输出电压平衡度。

2.1 双同步坐标系解耦法 DDSRF

基于双同步坐标系解耦法的原理,对三相电压 U_{abc} 同时进行与三相电压方向相同的正序 Park 变换和与三相电压方向相反的 Park 变换,通过双 Park 变换分别检测分离出正序分量和负序分量。

首先,对三相电压进行正序、负序双 Park 变换后可得:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = P_P^{-1} \begin{bmatrix} u_d^P \\ u_q^P \end{bmatrix} + P_N^{-1} \begin{bmatrix} u_d^N \\ u_q^N \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: P_P^{-1} 、 P_N^{-1} 分别为正序和负序下的 Park 变换逆矩阵。在式(11)中分别左乘正、负序 Park 变换矩

阵 P_P 、 P_N 可得:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d^p \\ u_q^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ -\sin 2\omega t & \cos 2\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d^N \\ u_q^N \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\omega t & -\sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & \cos 2\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d^p \\ u_q^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d^N \\ u_q^N \end{bmatrix} \quad (13)$$

显然, 对原来的三相电压进行正序 Park 变换时, 能够变换出正序 dq 轴直流分量, 同时负序分量为二倍频的交流分量; 同理对三相电压进行负序 Park 变换时, 能够变换出负序 dq 轴直流分量, 同时正序分量为二倍频的交流分量。在此基础上, 可通过低通滤波器 LPF 滤除二倍频分量, 其原理如图 5 所示。其中正序模块原理如图 6 所示。

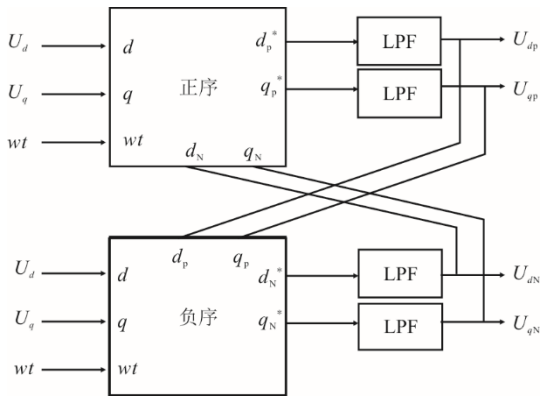


图 5 DDSRF 原理
Fig.5 DDSRF principle

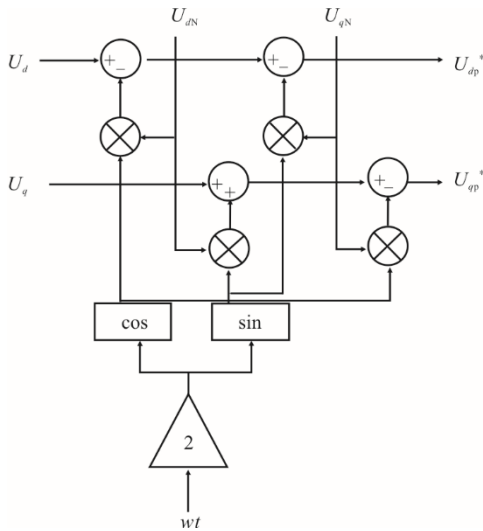


图 6 DDSRF 正序模块原理
Fig.6 DDSRF positive sequence module principle

负序模块与正序模块类似, 只需要将角速度方向取反即可, 即取 $-2\omega t$ 。

2.2 基于 DDSRF 的 VSG 电压电流正负序分离控制

在弱电网中接入的负载不对称时, 要求储能变

流器提供的参考电压三相平衡, 即 VSG 输出电压中仅有正序分量, 负序分量为 0。本文所提的电压电流双闭环 PI 控制需要进行分序解耦控制, 在负序控制中, 负序电压指令值设定为 0。

正序电压电流环解耦控制算法如下:

$$\begin{cases} i_{dref}^p = \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) (u_{dref} - u_{cd}^p) - \omega C_f u_{cq}^p + i_d^p \\ i_{qref}^p = \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) (u_{qref} - u_{cq}^p) + \omega C_f u_{cd}^p + i_q^p \\ u_d^p = \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{dref}^p - i_{cd}^p) - \omega L_f i_{cq}^p + u_{cd}^p \\ u_q^p = \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{qref}^p - i_{cq}^p) + \omega L_f i_{cd}^p + u_{cq}^p \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可得, 因为 VSG 输出的指令电压由有功功率-频率、无功功率-电压控制环中计算得出, 三相对称, 因此正序控制环与电压电流双闭环控制相同。在计算出正序电压输出值后, 经过与 Park 变换得到正序电压输出信号。

负序电压电流环解耦控制算法如下:

$$\begin{cases} i_{dref}^N = \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) (0 - u_{cd}^N) - \omega C_f u_{cq}^N + i_d^N \\ i_{qref}^N = \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) (0 - u_{cq}^N) + \omega C_f u_{cd}^N + i_q^N \\ u_d^N = \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{dref}^N - i_{cd}^N) - \omega L_f i_{cq}^N + u_{cd}^N \\ u_q^N = \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{qref}^N - i_{cq}^N) + \omega L_f i_{cd}^N + u_{cq}^N \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知, 为了使 VSG 输出的电压负序分量为 0, 因此设定指令电压为 0, 通过负序电压电流控制环中的负序分量计算得出负序电压补偿值。在计算出负序电压补偿值后, 需经过与正序旋转方向相反的负序 Park 变换得到负序电压补偿信号。

正负序电压电流控制结构如图 7 所示。图中, u_{dref} 、 u_{qref} 为 VSG 输出电压的指令值; u_{cd} 、 u_{cq} 为 VSG 输出电压的实际值; i_d 、 i_q 为变流器侧电感电流; i_{dref} 、 i_{qref} 为 VSG 输出电流指令值; i_{cd} 、 i_{cq} 为 VSG 输出实际电流值。由图 7 可见, 该控制结构分为上下两部分, 上半部分为正序电压电流双闭环控制, 下半部分为负序电压电流双闭环控制, 正序和负序控制结构相同, 区别为上半部分输入正序参数, 下半部分输入负序参数。在经过电压电流双闭环控制前, 将 VSG 中的输出电压、电流以及 VSG 机端电流和参考电压信息通过正负序分离, 输入相应

的正负序控制环中。

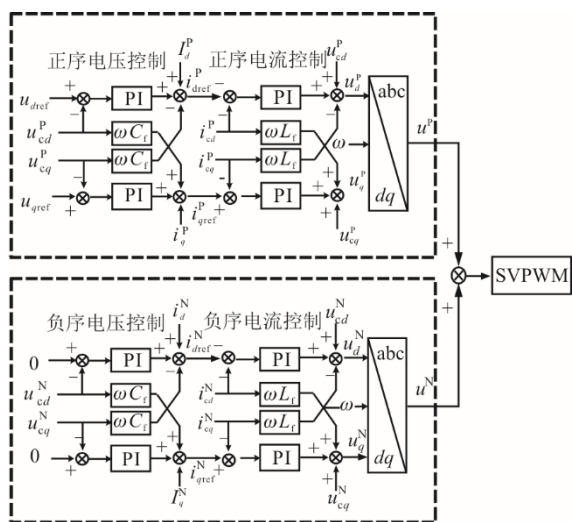


图 7 正负序电压电流控制结构

Fig.7 Block diagram of positive and negative sequence voltage and current control structure

图 8 为基于 DDSRF 的 VSG 不平衡电压控制策略结构。由图 8 可见，首先将 VSG 的参考电压和实际输出正序电压作差送入正序电压 PI 控制器中，通过交叉耦合补偿和正序电流前馈补偿，得到正序电流控制信号。再将正序电流控制信号与实际输出正序电流信号作差送入 PI 控制器中，通过交叉耦合补偿和正序电压前馈补偿，得到正序电压控制信号，最终通过正序 Park 反变换得到 abc 坐标系下的正序调制电压信息。

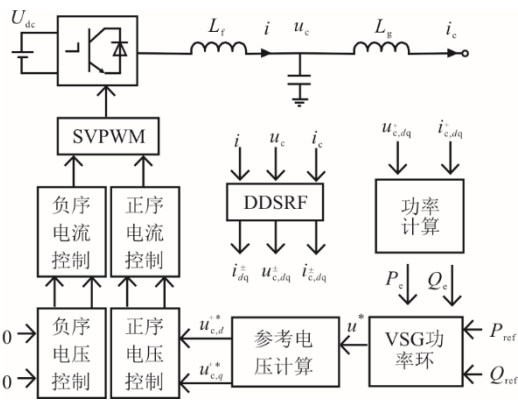


图 8 不平衡电压控制策略结构

Fig.8 Structural diagram of unbalanced voltage control strategy

将 VSG 的负序参考电压和实际输出负序电压作差送入负序电压 PI 控制器中，通过交叉耦合补偿和负序电流前馈补偿，得到负序电流控制信号。再将负序电流控制信号与实际输出负序电流信号作

差送入 PI 控制器中，通过交叉耦合补偿和负序电压前馈补偿，得到负序电压控制信号，最后通过负序 Park 反变换得到 abc 坐标系下的负序调制电压信息。最终将正负序电压电流环处理的结果经过 Park 逆变换后两者结果相加，可得到输出电压指令。

3 仿真验证

为了验证本文所提出的 VSG 改进分序控制技术在不平衡负载下对不平衡电压的控制能力，根据所提 VSG 总体框图及基于 DDSRF 的分序控制策略，搭建了储能 VSG 仿真模型，所使用的仿真软件为 MATLAB/Simulink。本文储能 VSG 模型的具体仿真参数见表 1。

表 1 储能 VSG 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of energy storage VSG

参数	数值
直流侧母线电压 U_{dc}/V	800
交流侧母线电压 U_{abc}/V	220
工频频率 f_n/Hz	50
有功惯性系数 $J/(kg \cdot m^2)$	0.33
滤波器电感 L_f/mH	5
滤波器等效电阻 R_f/Ω	0.1
滤波电容 $C_f/\mu F$	10
无功下垂系数 $D_q(N \cdot m^2)$	6

为验证基于 DDSRF 的正负序分离技术能够实现对正负序分量进行分离，在 MATLAB/Simulink 中搭建了相应的仿真模型，将设置好的不平衡电压使用 DDSRF 和 ROR 2 种技术进行分离，得到正、负序分量，并对 DDSRF 与 ROR 2 种技术分离的结果进行比较。

在本次研究中的三相不平衡电压参数为：相电压 a、c 相为 220 V，b 相为 110 V，周期 50 Hz。不平衡三相电压波形如图 9 所示。

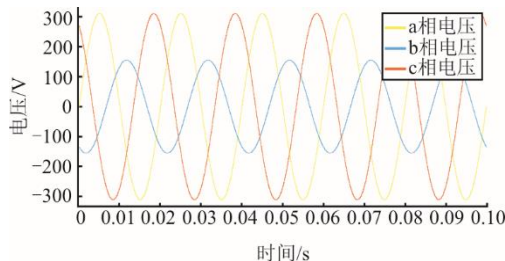


图 9 不平衡三相电压波形

Fig.9 Unbalanced three-phase voltage waveform

基于 DDSRF 与 ROR 正负序分离方法的正序电压分离结果如图 10 和图 11 所示。从图 10 和图 11

可得，2 种正负序分离方法在不平衡电压的正序分离结果上一致，三相电压对称性高。基于 DDSRF 与 ROR 分离方法的负序电压分离结果如图 12 和图 13 所示。

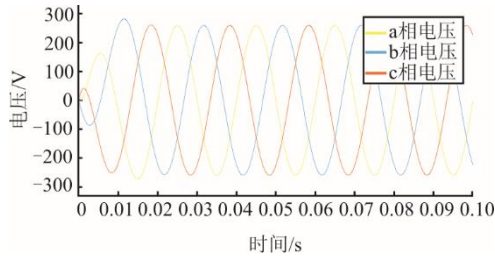


图 10 基于 DDSRF 分离的正序电压波形
Fig.10 Positive sequence voltage waveform based on DDSRF separation

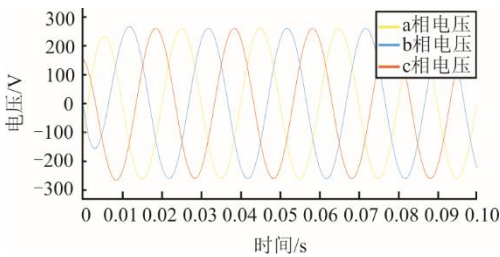


图 11 基于 ROR 分离的正序电压波形
Fig.11 Positive sequence voltage waveform based on ROR separation

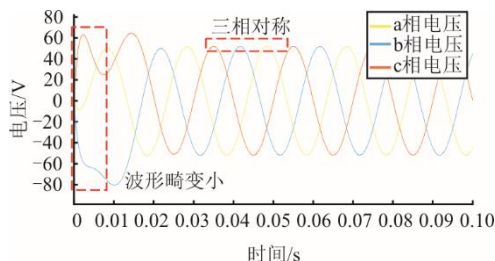


图 12 基于 DDSRF 分离的负序电压波形
Fig.12 Negative sequence voltage waveform based on DDSRF separation

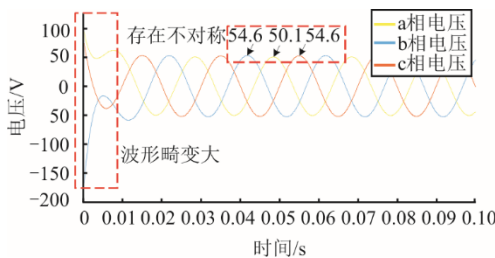


图 13 基于 ROR 分离的负序电压波形
Fig.13 Negative sequence voltage waveform based on ROR separation

由图 12 和图 13 可见，基于 DDSRF 的正负序

分离方法在不平衡电压的负序分离结果波形畸变率小，负序电压对称性好。基于 ROR 的正负序分离方法在不平衡电压的负序分离结果波形畸变率大，负序电压对称性差。

为了验证 VSG 不平衡电压控制的稳定，搭建了 VSG 仿真控制模型，负载功率为 9 kW，在 1 s 时在 b 相投入功率为 6 kW 的不平衡负载。不平衡工况下的传统 VSG 控制和基于 DDSRF 的 VSG 改进控制输出电压如图 14 和图 15 所示。

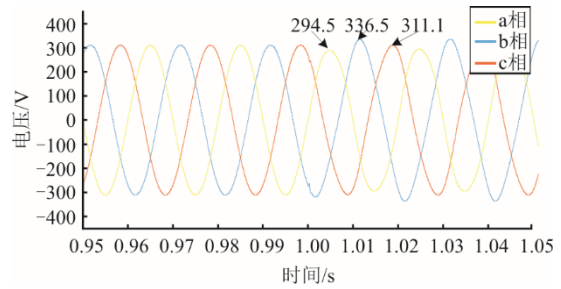


图 14 传统 VSG 控制电压波形
Fig.14 Conventional VSG control voltage waveform

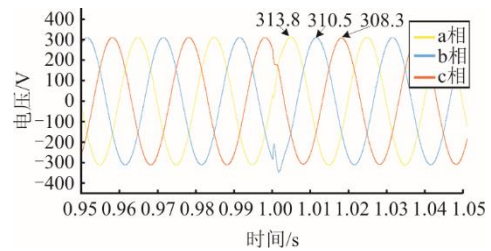


图 15 基于 DDSRF 分序的 VSG 控制电压波形
Fig.15 VSG control voltage waveform based on DDSRF sequencing

从图 14 和图 15 可以看出：在 1 s 前即不平衡负载投入前，传统 VSG 和 DDSRF 分序控制输出的三相电压幅值均相等，对称度高；在 1 s 后即不平衡负载投入后，传统 VSG 控制的三相电压幅值间具有较大的差值，三相电压波形不对称度高，DDSRF 分序控制在不平衡负载下的三相电压幅值间的差值小，三相电压波形对称度高。

不平衡工况下的传统 VSG 控制和基于 DDSRF 的 VSG 改进控制输出电压不平衡度如图 16 所示。从图 16 可以看出：在 1 s 前即不平衡负载投入前，传统 VSG 控制和 DDSRF 分序控制的三相电压不平衡度均为 0；在 1 s 后即不平衡负载投入后，传统 VSG 控制的三相电压不平衡度在 4% 上下波动，超出了国标对于三相电压不平衡度控制 2% 以内的要求；DDSRF 分序控制的三相电压不平衡度在 0.1 s 突增到 1.3% 后迅速抑制到 0.2% 以内，符合国标对

于三相电压不平衡度的要求。DDSRF 分序控制比传统 VSG 控制在不平衡负载投入下的三相电压不平衡度抑制能力更强。

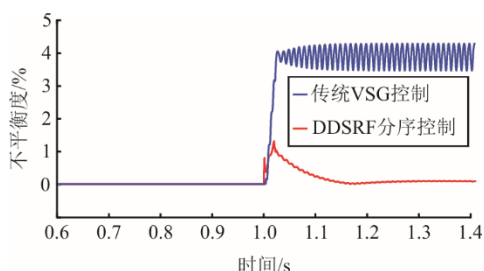


图 16 传统 VSG 控制和 DDSRF 分序控制输出电压不平衡度
Fig.16 The output voltage imbalance of conventional VSG control and DDSRF sequential control

不平衡工况下的传统 VSG 控制和基于 DDSRF 的 VSG 改进控制输出功率如图 17 所示。

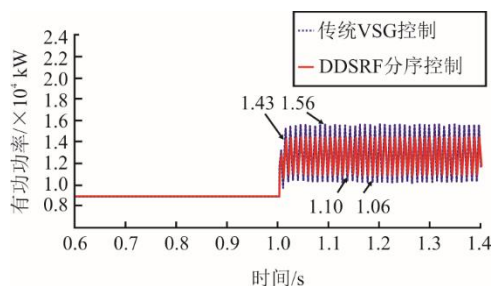


图 17 传统 VSG 控制和 DDSRF 分序控制有功功率输出
Fig.17 Conventional VSG control and DDSRF sequential control for active power output

从图 17 可以看出:在 1 s 前即不平衡负载投入前,传统 VSG 控制和 DDSRF 分序控制的有功功率输出均为 9 000 kW;在 1 s 后即不平衡负载投入后,传统 VSG 控制的有功功率输出在 13 000 kW 上下波动,振幅为 5 000 kW;DDSRF 分序控制的有功功率输出在 12 000 kW 上下波动,振幅为 3 300 kW,DDSRF 分序控制在有功功率输出上比传统 VSG 控制更好。

4 结 论

本文针对弱电网应对不平衡负载能力弱的场景,提出结合构网型储能控制技术进行电压支撑。

1) 详细介绍了储能 VSG 的内部结构,分析了 VSG 输出电压、电流不平衡后产生功率二倍频波动的机理;在不平衡负载场景下,VSG 输出的功率波动由电压、电流的正负序分量耦合而成,无法完全消除。

2) 提出了基于 DDSRF 的正负序分离控制技

术,并且进行了仿真验证。结果表明,本文提出的基于 DDSRF 的 VSG 改进正负序分离控制策略能够有效控制 VSG 输出电压三相平衡,抑制功率波动。

[参考文献]

- [1] 高红均,郭明浩,刘挺坚,等.新型电力系统电力电量平衡分析研究综述[J].高电压技术,2023,49(7):2683-2696.
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Tingjian, et al. Review on electric power and energy balance analysis of new-generation power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2683-2696.
- [2] 滕亮亮,谈超,昌力,等.高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J].电力系统自动化,2023,47(15):12-35.
TENG Xianliang, TAN Chao, CHANG Li, et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 12-35.
- [3] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Research on building a new power system framework with new energy as the main body[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [4] 葛豪宇,杨明,方聪,等.弱电网下计及并网逆变器耦合效应的新型锁相环设计方法及其稳定性分析[J/OL].电网技术,1-12[2024-07-29].https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2154.
GE Haoyu, YANG Ming, FANG Cong, et al. A new phase-locked loop design method and stability analysis considering the coupling effect of grid-connected inverter under weak grid[J/OL]. Power System Technology, 1-12[2024-07-29]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2154.
- [5] 罗家林,陈超,黄梅,等.弱电网矿区下构网型储能控制技术[J].高压电器,2023,59(7):95-103.
LUO Jialin, CHEN Chao, HUANG Mei, et al. Research on energy storage control technology for underlying grid in weak current network mining areas[J]. High Voltage Electrical Appliances, 2023, 59(7): 95-103.
- [6] 王晗,王富文,周党生,等.电网故障下永磁直驱风电机组并网电流的自抗扰控制[J/OL].上海交通大学学报,1-18[2024-07-29].https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.159.
WANG Han, WANG Fuwen, ZHOU Dangsheng, et al. Active disturbance rejection control strategy for current of direct drive wind turbine under power grid fault[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1-18[2024-07-29]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.159.
- [7] 王晓寰,闵帆,张旭东,等.弱电网下基于虚拟同步机的并网逆变器短路电流抑制研究[J].电工电能新技术,2023,42(3):13-22.
WANG Xiaohuan, MIN Fan, ZHANG Xudong, et al. Research on short-circuit current suppression of grid connected inverters based on virtual synchronous machines in weak current networks[J]. New Technologies for Electrical Energy in Electricians, 2023, 42(3): 13-22.

- [8] 吴瀚, 徐海亮, 张利, 等. 弱电网下含负序控制的双馈风机阻抗建模及关键致稳因素评估[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2516-2528.
WU Han, XU Hailiang, ZHANG Li, et al. Impedance modeling and evaluation of key stabilizing factors for doubly fed wind turbines with negative sequence control in weak current networks[J]. High Voltage Technology, 2023, 49(6): 2516-2528.
- [9] 李建林, 邸文峰, 李雅欣, 等. 长时储能技术及典型案例分析[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 85-94.
LI Jianlin, DI Wenfeng, LI Yaxin, et al. Long term energy storage technology and typical case analysis[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 85-94.
- [10] 李建林, 姜治蓉, 马速良, 等. 新型电力系统下分布式储能应用场景与优化配置[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 30-41.
LI Jianlin, JIANG Yerong, MA Suliang, et al. Application scenarios and optimized configuration of distributed energy storage in new power systems[J]. High Voltage Technology, 2024, 50(1): 30-41.
- [11] 姜海洋, 杜尔顺, 马佳豪, 等. 考虑长周期供需不平衡风险的新型电力系统规划方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14[2024-07-29]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230440>.
JIANG Haiyang, DU Ershun, MA Jiahao, et al. Power system optimal planning method considering long-term imbalance risk[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-14[2024-07-29]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230440>.
- [12] RODRIGO D T, JAMES O, VALERIO D A, et al. Cyberphysical security of grid battery energy storage systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 59675-59722.
- [13] 李建林, 方知进, 李雅欣, 等. 用于应急的移动储能系统集群协同控制综述[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 75-82.
LI Jianlin, FANG Zhijin, LI Yaxin, et al. Overview of collaborative control of mobile energy storage system clusters for emergency response[J]. Power Construction, 2022, 43(3): 75-82.
- [14] SANTOSO F A, SYAI'IN M, SETIYOKO A S. A comparative study of single-tuned filter and detuned reactor for improve power quality in microgrid[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019, 462(1): 012029.
- [15] 李建林, 谭宇良, 王含, 等. 配网及光储微网储能系统配置优化策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1893-1902.
LI Jianlin, TAN Yuliang, WANG Han, et al. Optimization strategy for configuration of distribution network and optical storage microgrid energy storage system[J]. High Voltage Technology, 2022, 48(5): 1893-1902.
- [16] REN B X, LI Q, ZOU X M, et al. An novel oscillation suppression strategy for permanent magnetic synchronous generator based on grid-forming control[J]. Energy Reports, 2024, 11: 3163-3170.
- [17] 李建林, 丁子洋, 刘海涛, 等. 构网型储能变流器及控制策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 679-686.
LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid type energy storage converter and control strategy[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.
- [18] 赵辉, 王涛, 胡平, 等. 改进 VSG 和下垂控制双驱动的孤岛微电网稳定运行控制策略[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 1-12[2024-07-29]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001401>.
ZHAO Hui, WANG Tao, HU Ping, et al. Improved control strategy for stabilized operation of islanded microgrid with dual drive of VSG and droop control[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1-12[2024-07-29]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001401>.
- [19] 韩平平, 陈鹏飞, 丁明, 等. VSG 控制下直驱风机惯量支撑能力定量分析[J/OL]. 电网技术, 1-11[2024-07-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1908>.
HAN Pingping, CHEN Pengfei, DING Ming, et al. Quantitative analysis of inertia support capability of direct-drive turbine under VSG control[J/OL]. Power System Technology, 1-11[2024-07-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1908>.
- [20] 宗皓翔, 张琛, 鲍颜红, 等. 跟网型与构网型并网变换器系统的频域建模与同步视角交互稳定机理[J/OL]. 上海交通大学学报, 1-22[2024-07-29]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.231>.
ZONG Haoxiang, ZHANG Chen, BAO Yanhong, et al. Frequency-domain modeling and synchronization perspective interaction mechanism of GFL-GFM converter system[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1-22[2024-07-29]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.231>.
- [21] 刘兆国, 汤楠雪, 张瀚超, 等. 不平衡电网电压下虚拟同步发电机模型预测控制[J]. 电工技术, 2024(1): 12-17.
LIU Zhaoguo, TANG Nanxue, ZHANG Hanchao, et al. Predictive control of virtual synchronous generator model under unbalanced grid voltage[J]. Electrical Technology, 2024(1): 12-17.
- [22] 金石, 梁帅, 施隆. 不平衡电网下无刷双馈风电系统的虚拟同步发电机控制[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2426-2435.
JIN Shi, LIANG Shuai, SHI Long. Virtual synchronous generator control of brushless doubly fed wind power system under unbalanced power grid[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2426-2435.
- [23] 王辉, 周子扬, 吕维港, 等. 基于 RORR 的 VSG 带不平衡负载控制策略研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(5): 109-116.
WANG Hui, ZHOU Ziyang, LYU Weigang, et al. Research on VSG with unbalanced load control strategy based on RORR[J]. Computer Simulation, 2022, 39(5): 109-116.
- [24] 孙宇新, 舒文凯, 施凯. 不平衡负载下 VSG 平衡电压控制[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(12): 61-68.
SUN Yuxin, SHU Wenkai, SHI Kai. VSG balanced voltage control under unbalanced load[J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(12): 61-68.
- [25] 汪怡秀, 王辉, 郝玢鑫, 等. 基于 VSG 的电网电压不平衡下并网逆变器控制策略[J]. 可再生能源, 2022, 40(5): 696-702.
WANG Yixiu, WANG Hui, ZHU Binxin, et al. Control strategy of grid connected inverters under voltage imbalance in power grid based on VSG[J]. Renewable Energy, 2022, 40(5): 696-702.

(责任编辑 杜亚勤)