

海上风电经 VSC-HVDC 系统受端电网不对称故障抑制策略^{*}

陈立, 王正齐, 叶冰艺, 陆鹏
(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 海上风电经柔性直流输电技术(即基于电压源换流器的高压直流输电系统, VSC-HVDC)送出系统中受端电网故障不仅影响受端换流站交直流侧系统的运行状态, 严重情况下也会阻碍送端换流站和海上风电机组的正常运行。针对这一实际问题, 分析了海上风电经 VSC-HVDC 送出系统中受端电网发生不对称故障的传播机理, 提出了一种基于 Lyapunov 函数方法的负序分量抑制策略。首先, 建立了海上风电机组经 VSC-HVDC 送出系统的拓扑结构, 并分析了受端电网发生不对称故障的传播机理。其次, 根据受端换流站的数学模型推导出满足 Lyapunov 函数全局稳定性的负序开关函数, 并求解出开关函数的系数, 进一步设计出相应的 Lyapunov 函数控制器。最后, 基于 MATLAB/Simulink 软件仿真将所提策略与传统 PI 控制进行对比, 验证了所提策略的正确性和有效性。

关键词: 海上风电; 柔性直流输电技术; 不对称故障分析; 负序分量抑制; Lyapunov 函数

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)09-0070-08

doi: 10.12177/emca.2023.103

Suppression Strategy for Asymmetric Faults in the Receiving-End Grid of Offshore Wind Power Through VSC-HVDC System^{*}

CHEN Li, WANG Zhengqi, YE Bingyi, LU Peng
(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211100, China)

Abstract: The failure of the receiving-end grid in the voltage source converter (VSC) based high voltage direct current (HVDC) system of offshore wind power not only affects the operation status of the AC/DC side system of the receiving-end converter station, but also hinders the normal operation of the sending-end converter station and offshore wind turbines in severe cases. In order to solve this problem, the propagation mechanism of asymmetric faults in the receiving-end grid of offshore wind power transmission system through VSC-HVDC was analyzed, and a negative sequence component suppression strategy based on Lyapunov function method was proposed. Firstly, the topology structure of the offshore wind turbine transmission system through VSC-HVDC was established, and the propagation mechanism of asymmetric faults in the receiving-end grid was analyzed. Secondly, based on the mathematical model of the receiving-end converter station, a negative sequence switching function that satisfies the global stability of the Lyapunov function is derived, and the coefficients of the switching function are solved. Thus, the corresponding Lyapunov function controller is further designed. Finally, the proposed strategy was compared with traditional PI control based on MATLAB/Simulink software simulation to verify its correctness and effectiveness.

Key words: offshore wind power; voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC); asymmetric fault analysis; negative sequence component suppression; Lyapunov function

收稿日期: 2023-05-04; 收到修改稿日期: 2023-05-22

^{*} 基金项目: 江苏省大学生创新创业训练计划(202311276172H)

作者简介: 陈立(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电。

王正齐(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子与电力传动。(通信作者)

0 引言

近几年,随着“新能源电力系统”和“双碳目标”的提出,海上风电送出技术取得了迅速发展^[1-2]。由于柔性直流输电技术(即基于电压源换流器的高压直流输电系统,VSC-HVDC)可以阻断风电场与交流系统之间的故障传播,实现海上风电机组的灵活控制,海上风电机组通常采用VSC-HVDC输电方式接入受端交流电网。然而这种方式使得受端电网的运行情况变得复杂,尤其是受端电网不对称故障产生的负序分量易在换流站的交直流侧互相传播^[3-4],从而影响整个系统的正常运行。因此,研究海上风电经VSC-HVDC送出系统中受端电网不对称故障具有重要意义。

海上风电经VSC-HVDC送出系统中受端电网故障与柔性直流输电系统中受端电网故障具有相通之处,因此可以借鉴。目前,关于柔性直流输电系统中受端电网不对称故障的负序分量抑制策略主要分为以下三大类:(1)以双环控制器为基础的正负序分离控制策略^[5];(2)以抑制二倍频功率为基础的功率补偿控制策略^[6];(3)负序电压补偿控制策略^[7]。上述的第一类方法通常以双环PI控制器为基础建立正序控制器和负序控制器,简便实用,但抑制谐波能力较弱。尤其是逆变侧交流系统发生不对称故障时产生的负序分量会使得直流电压和电流含有二倍频谐波^[8-9],反过来直流侧的谐波也会对交流侧产生影响。若谐波抑制能力较弱,系统的正常运行将会受到影响。第二类方法可以实时控制换流站交直流侧的功率平衡,实现功率传输,但这种方法需要采用陷波器对输出功率进行实时滤波,增加了控制系统的阶数。第三类方法可以有效抑制负序电流,实现限流控制,但需要计算电压的矢量相位,导致控制比较繁琐。

本文借鉴第一类方法的优点,重点对正负序分离控制器进行深入研究,应用Lyapunov函数控制取代传统PI控制。Lyapunov函数方法是分析闭环系统关于其平衡点行为的一种非常实用的技术^[10-12],因此可以用来确定VSC换流站在其平衡点附近的全局稳定性。如果VSC的总能量连续耗散,状态变量则收敛到平衡点。其主要目的是通过使Lyapunov函数始终为负来找到一个确保系统全局稳定性的控制规律。综上所述,可利用Lyapunov函数方法实现故障条件下对目标变量较好地控制。因此,本文首先建立海上风电机组经VSC-HVDC送出系统的拓扑结构,并利用受端VSC换流站拓扑及其数学模型进行不对称故障分析,指出了由负序分量引起的谐波在受端交直流侧的传播机理;其次,设计了基于Lyapunov函数方法的正负序控制器,并求解相应的控制器系数;最后,基于MATLAB/Simulink仿真软件将所提方法与传统PI控制进行对比,突出其谐波抑制的优势。

1 系统拓扑和受端交流系统不对称故障分析

1.1 系统拓扑

图1为海上风电经VSC-HVDC送出的系统拓扑结构图。由图1可知,海上永磁直驱风电机组通过机侧换流器和网侧换流器送出50 Hz的三相交流电,经风电汇集线路和4.16 kV/220 kV升压变压器送至并网点。文献[13-14]对直驱风电机组、机侧换流器以及网侧换流器展开了详细介绍,因此本文将不再赘述。并网点处的电能通过220 kV/150 kV降压变压器、VSC-HVDC输电系统以及150 kV/220 kV升压变压器输送至受端电网。其中,送端VSC1换流站采用VF控制策略实

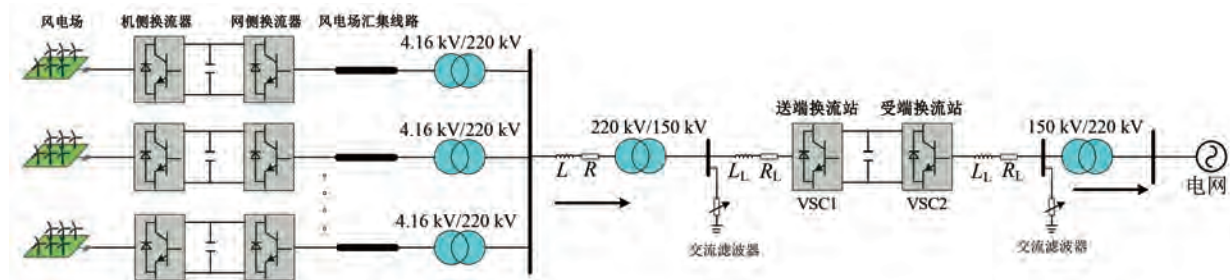


图1 海上风电经VSC-HVDC送出的系统拓扑结构

现风电并网的电压和频率控制,受端 VSC2 换流站采用定直流电压控制。

送端交流系统的支撑仅来自于海上风电机组,与其不同的是,受端电网的组成比较复杂,故障特征难以捕捉。海上风电机组又因为远离受端电网,无法针对受端电网故障对控制系统进行实时调控,则导致整个系统的故障控制效果较差。因此,有必要对受端电网故障进行详细分析,并提出相应的策略抑制其影响。

1.2 受端交流系统不对称故障分析

为了深度分析受端 VSC 侧换流站交流系统的不对称故障特征和传播机理,图 2 给出了 VSC 侧换流站的详细模型。系统稳态时,图 2 所示拓扑的数学模型为^[15]

$$\begin{cases} L_L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = u_{sa} - u_{dc}(2S_a - S_b - S_c)/3 \\ L_L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = u_{sb} - u_{dc}(2S_a - S_b - S_c)/3 \\ L_L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = u_{sc} - u_{dc}(2S_a - S_b - S_c)/3 \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = -i_{dc} + i_d = -i_{dc} + (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{dc} 和 u_{dc} 分别为受端换流站的直流电流和直流电压; i_d 为三相桥臂电流馈入至直流侧的成分; i_a, i_b, i_c 为交流电网馈入至换流站的三相电流; R_L 和 L_L 分别为换流站出口线路的电阻和电感; u_s 为换流母线处电压; u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 分别为 VSC 换流站输出的三相电压; S_a, S_b, S_c 分别为换流站三相桥臂的开关函数。

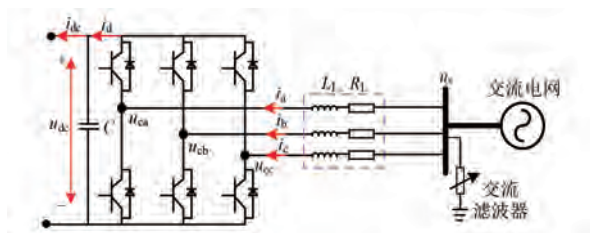


图 2 受端 VSC 换流站的详细模型

通常情况下,VSC 侧换流站与交流系统连接的换流变压器的接线为 YNd 型,所以零序电流不会通过 VSC 换流站,只需要考虑故障电流的正序和负序分量即可^[16]。此时,三相短路电流可表

示为

$$\begin{cases} i_a = I_m^+ \sin(\omega t + \theta^+) + I_m^- \sin(\omega t + \theta^-) \\ i_b = I_m^+ \sin(\omega t + \theta^+ - 2\pi/3) + \\ \quad I_m^- \sin(\omega t + \theta^- + 2\pi/3) \\ i_c = I_m^+ \sin(\omega t + \theta^+ + 2\pi/3) + \\ \quad I_m^- \sin(\omega t + \theta^- - 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_m^+ 和 I_m^- 分别为正序电流和负序电流的幅值; θ^+ 和 θ^- 分别为正序电流和负序电流的相角。

假设 VSC 换流站交流系统发生短路的瞬间,换流站内三相桥臂的开关函数仍然保持对称,则存在以下关系:

$$\begin{cases} S_a = S_m \sin(\omega t + \theta_s) \\ S_b = S_m \sin(\omega t + \theta_s - 2\pi/3) \\ S_c = S_m \sin(\omega t + \theta_s + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_m 为三相开关函数的幅值, θ_s 为开关函数的相角。

此时,馈入至直流侧电流的分量 i_d 为

$$\begin{aligned} i_d &= S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c = \\ &S_m \sin(\omega t + \theta_s) \cdot [I_m^+ \sin(\omega t + \theta^+) + \\ &I_m^- \sin(\omega t + \theta^-)] + S_m \sin(\omega t + \theta_s - 2\pi/3) \cdot \\ &[I_m^+ \sin(\omega t + \theta^+ - 2\pi/3) + \\ &I_m^- \sin(\omega t + \theta^- + 2\pi/3)] + \\ &S_m \sin(\omega t + \theta_s + 2\pi/3) \cdot \\ &[I_m^+ \sin(\omega t + \theta^+ + 2\pi/3) + \\ &I_m^- \sin(\omega t + \theta^- - 2\pi/3)] = \\ &\frac{3}{2} S_m I_m^+ \cos(\theta_s - \theta^+) - \\ &\frac{3}{2} S_m I_m^- \cos(2\omega t + \theta_s + \theta^-) \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知,交流系统发生不对称故障时将会在三相桥臂的直流电流中产生一个二倍频负序分量,进而引起直流侧电压也含有二倍频谐波。此时,可定义故障后直流侧电压为

$$u'_{dc} = u_{dc} + u_{dc2} \cos(2\omega t + \theta_2) \quad (5)$$

式中: u_{dc2} 为二倍频电压幅值; θ_2 为二倍频电压的相角。

VSC 换流站输出电压与直流侧电压存在以下关系, $u_{cx} = S_x u_{dc}$ ($x = A, B, C$)。以 A 相为例,故障后 VSC 换流站输出的 A 相电压为

$$u_{ca} = S_a \cdot u'_{dc} =$$

$$S_m \sin(\omega t + \theta_s) \cdot [u_{dc} + u_{dc2} \cos(2\omega t + \theta_2)] = \\ S_m u_{dc} \sin(\omega t + \theta_s) + \\ \frac{1}{2} S_m u_{dc2} [\sin(3\omega t + \theta_s + \theta_2) + \\ \sin(-\omega t + \theta_s - \theta_2)] \quad (6)$$

由式(6)可知,直流电压的二倍频谐波将在换流站的交流系统中产生一个三倍频交流电压谐波。反之,交流系统的三倍频谐波又会在直流侧电压中产生一个四倍频的谐波。因此,提出相应的控制策略抑制负序分量显得尤为重要。

2 基于 Lyapunov 函数方法的负序分量抑制策略

上一章节主要叙述了系统拓扑和受端交流系统发生不对称短路故障的特征,尤其是故障后产生的负序分量将会扩大故障的传播范围,影响直流系统的安全运行。因此,本章节将提出一种基于 Lyapunov 函数方法的负序分量控制策略。由式(1)可得到 dq 轴坐标系下正序分量、负序分量的数学模型,可表示为

$$\begin{cases} L_L \frac{di_d^+}{dt} = -Ri_d^+ + \omega L_L i_q^+ - u_{cd}^+ + u_{sd}^+ \\ L_L \frac{di_q^+}{dt} = -Ri_q^+ - \omega L_L i_d^+ - u_{cq}^+ + u_{sq}^+ \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (i_d^+ S_d^+ + i_q^+ S_q^+) - i_{dc} \end{cases} \quad (7)$$

式中: i_d^+ 、 i_q^+ 分别为三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 在 dq 轴上的正序分量。

$$\begin{cases} L_L \frac{di_d^-}{dt} = -Ri_d^- - \omega L_L i_q^- - u_{cd}^- + u_{sd}^- \\ L_L \frac{di_q^-}{dt} = -Ri_q^- + \omega L_L i_d^- - u_{cq}^- + u_{sq}^- \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (i_d^- S_d^- + i_q^- S_q^-) - i_{dc} \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_d^- 、 i_q^- 分别为三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 在 dq 轴上的负序分量。

以下将以负序分量的数学模型为例介绍 Lyapunov 函数控制器的设计。定义状态变量函数为

$$[x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [i_d^- \quad i_q^- \quad u_{dc}]^T \quad (9)$$

则状态变量的参考值为

$$[x_{1ref} \quad x_{2ref} \quad x_{3ref}]^T = [i_{dref}^- \quad i_{qref}^- \quad u_{dcref}]^T \quad (10)$$

将式(9)与式(10)作差,可得到状态变量的误差函数为

$$[x_{e1} \quad x_{e2} \quad x_{e3}]^T = [i_d^- - i_{dref}^- \quad i_q^- - i_{qref}^- \quad u_{dc} - u_{dcref}]^T \quad (11)$$

故参考式(8)可得到负序分量的误差状态方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_{e1}}{dt} = -\frac{R_L}{L_L} x_{e1} - \omega x_{e2} + \frac{S_d^-}{L_L} x_3 + \frac{S_{nd}^-}{L_L} x_{3ref} \\ \frac{dx_{e2}}{dt} = -\frac{R_L}{L_L} x_{e1} + \omega x_{e1} + \frac{S_q^-}{L_L} x_3 + \frac{S_{nq}^-}{L_L} x_{3ref} \\ \frac{dx_{e3}}{dt} = -\frac{3}{2C} S_d^- x_1 + \frac{3}{2C} S_q^- x_2 - \frac{3}{2C} S_{nd}^- x_{1ref} - \frac{3}{2C} S_{nq}^- x_{2ref} \end{cases} \quad (12)$$

式中: S_{nd}^- 、 S_{nq}^- 分别为开关函数负序分量在稳态时的状态变量。另外,式(12)中存在以下数学关系^[17]: $u_{cd} = S_d^- u_{dc}$ 、 $u_{cq} = S_q^- u_{dc}$ 。

假设状态变量在稳态时能够跟踪到其参考值,则稳态时负序分量在 dq 轴上的状态变量为

$$\begin{cases} S_{nd}^- = \frac{L_L}{x_{3ref}} \left(-\frac{dx_{1ref}}{dt} - \frac{R_L}{L_L} x_{1ref} - \omega x_{2ref} + \frac{u_{sd}^-}{L_L} \right) \\ S_{nq}^- = \frac{L_L}{x_{3ref}} \left(-\frac{dx_{2ref}}{dt} - \frac{R_L}{L_L} x_{2ref} + \omega x_{1ref} + \frac{u_{sq}^-}{L_L} \right) \end{cases} \quad (13)$$

Lyapunov 函数法是分析闭环系统中平衡点运行轨迹的重要方法,其可以用来确定约束条件下系统在平衡点附近的全局稳定性。如果系统的总能量持续耗散,则状态变量将收敛到平衡点。其主要方式是通过使 Lyapunov 函数始终为负,找到一个确保系统全局稳定的控制律函数。根据以上分析,如果用 $V(x)$ 表示的 Lyapunov 函数,则具有以下特征^[18-20]:

- (1) $V(0) = 0$;
- (2) 对于 $x \neq 0$ 时存在 $V(x) > 0$;
- (3) 对于 $x \neq 0$ 时 $\dot{V}(x) < 0$ 。

此时,定义误差控制率函数

$$V(x_e) = \frac{3}{2} L_L x_{e1}^2 + \frac{3}{2} L_L x_{e2}^2 + \frac{1}{3} C x_{e3}^2 \quad (14)$$

对式(14)两边求导可得如下表达式:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_e) = & 3L_L \dot{x}_{e1} x_{e1} + 3L_L \dot{x}_{e2} x_{e2} + \frac{2}{3} C \dot{x}_{e3} x_{e3} = \\ & -3R_L x_{e1}^2 - 3R_L x_{e2}^2 + \\ & (S_d^- - S_{nd}^-)(x_{e3} x_{1ref} - 3x_{e1} x_{3ref}) + \\ & (S_q^- - S_{nq}^-)(x_{e3} x_{2ref} - 3x_{e2} x_{3ref}) \end{aligned} \quad (15)$$

令

$$\begin{cases} S_d^- = \alpha_1 (x_{e3} x_{1ref} - 3x_{e1} x_{3ref}) + S_{nd}^- \\ S_q^- = \alpha_2 (x_{e3} x_{2ref} - 3x_{e2} x_{3ref}) + S_{nq}^- \end{cases} \quad (16)$$

式中: α_1, α_2 为系数, 且假设存在以下关系 $\alpha_1 = \alpha_2 < 0$, 则 Lyapunov 控制率函数的第三条特征能够满足。

结合式(13)和式(16)可得到 PWM 调制的开关函数, 并设计相应的负序控制器为

$$\begin{cases} S_d^- = \alpha_1 (x_{e3} x_{1ref} - 3x_{e1} x_{3ref}) + \\ \quad \frac{L_L}{x_{3ref}} \left(-\frac{dx_{1ref}}{dt} - \frac{R_L}{L_L} x_{1ref} - \omega x_{2ref} + \frac{u_{sd}^-}{L_L} \right) \\ S_q^- = \alpha_2 (x_{e3} x_{2ref} + 3x_{e2} x_{3ref}) + \\ \quad \frac{L_L}{x_{3ref}} \left(-\frac{dx_{2ref}}{dt} - \frac{R_L}{L_L} x_{2ref} + \omega x_{1ref} + \frac{u_{sq}^-}{L_L} \right) \end{cases} \quad (17)$$

观察式(17)可知, 如果能够给出系数 α_1, α_2 的取值, 则负序控制器将被较好的设计。假设状态变量在 t 时刻的参考值为 $X_{1ref}, X_{2ref}, X_{3ref}$, 令

$$\begin{cases} \frac{X_{1ref}}{X_{3ref}} = \eta_1 \frac{x_{1ref}}{x_{3ref}}, \frac{X_{2ref}}{X_{3ref}} = \eta_2 \frac{x_{2ref}}{x_{3ref}} \\ \beta_1 = \frac{x_{e1}}{x_{1ref}}, \beta_2 = \frac{x_{e2}}{x_{2ref}}, \beta_3 = \frac{x_{e3}}{x_{3ref}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: η_1, η_2 为参数变量因子, 且满足 $\eta_1 > 0, \eta_2 > 0$ 。

将式(18)代入式(15)中, 并结合式(16)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_e) = & -x_{1ref}^2 [-\alpha_1 X_{3ref} x_{3ref} (\eta_1 \beta_3 - 3\beta_1) \cdot \\ & (\beta_3 - 3\beta_1) + 3R_L \beta_1^2] - \\ & x_{2ref}^2 [-\alpha_2 X_{3ref} x_{3ref} (\eta_2 \beta_3 - 3\beta_2) \cdot \\ & (\beta_3 - 3\beta_2) + 3R_L \beta_2^2] \end{aligned} \quad (19)$$

定义以下两个函数为

$$\begin{cases} f(\beta_1, \beta_3) = -\alpha_1 X_{3ref} x_{3ref} (\eta_1 \beta_3 - 3\beta_1) \cdot \\ \quad (\beta_3 - 3\beta_1) + 3R_L \beta_1^2 \\ f(\beta_2, \beta_3) = -\alpha_2 X_{3ref} x_{3ref} (\eta_2 \beta_3 - 3\beta_2) \cdot \\ \quad (\beta_3 - 3\beta_2) + 3R_L \beta_2^2 \end{cases} \quad (20)$$

如果 $f(\beta_1, \beta_3) > 0$ 和 $f(\beta_2, \beta_3) > 0$, 则 $\dot{V}(x) < 0$, 其满足 Lyapunov 函数稳定性要求。

以下以 $f(\beta_1, \beta_3)$ 函数为例来分析 α_1 的取值, 令

$$\begin{cases} r_1 = -\alpha_1 X_{3ref} x_{3ref} > 0 \\ \beta_3 = m_1 \beta_1 = m_2 \beta_2 \end{cases} \quad (21)$$

式中: m_1 和 m_2 为相关系数。

将式(21)代入式(20)可得:

$$\begin{aligned} f(\beta_1, \beta_3) = & r_1 (\eta_1 \beta_3 - 3\beta_1) (\beta_3 - 3\beta_1) + 3R_L \beta_1^2 = \\ & \beta_1^2 [\eta_1 r m_1^2 - 3(1 + \eta_1) r m_1 + 3R_L + 9r_1] = \\ & \beta_1^2 f(r_1, \eta_1, m_1) \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)中函数 $f(r, \eta_1, m_1)$ 是以变量 m_1 为未知数的一元二次方程, 且其开口方向向上, 故该方程存在最小值:

$$f(r_1, \eta_1, m_1)_{\min} = 3R_L + 9r_1 \left[1 - \frac{(1 + \eta_1)^2}{4\eta_1} \right] \quad (23)$$

如果 $f(r_1, \eta_1, m_1)_{\min} > 0$, 则 $f(\beta_1, \beta_3) > 0$ 。当 $f(r_1, \eta_1, m_1)_{\min} > 0$ 时, 存在以下关系:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{2R_L}{3r_1} \right) - \sqrt{\left(1 + \frac{2R_L}{3r_1} \right)^2 - 1} < \eta_1 < \\ \left(1 + \frac{2R_L}{3r_1} \right) + \sqrt{\left(1 + \frac{2R_L}{3r_1} \right)^2 - 1} \end{aligned} \quad (24)$$

若存在小于 1 的正数系数 ε_1 , 满足以下关系

$$\begin{aligned} \eta_1 \in (1 - \varepsilon_1, 1 + \varepsilon_1), \text{ 则有} \\ \begin{cases} \left(1 + \frac{2R_L}{3r_1} \right) - \sqrt{\left(1 + \frac{2R_L}{3r_1} \right)^2 - 1} = 1 - \varepsilon_1 \\ \left(1 + \frac{2R_L}{3r_1} \right) + \sqrt{\left(1 + \frac{2R_L}{3r_1} \right)^2 - 1} = 1 + \varepsilon_1 \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

利用式(23)和式(24)可求得 α_1 的取值范围为

$$0 < |\alpha_1| < \frac{4R_L(1 - \varepsilon_1)}{3x_{3ref} X_{3ref} \varepsilon_1^2} \quad (26)$$

综上, 将求解出的 α_1 代入式(17)即可进行负序控制器的设计。同理, 可参照上述过程设计相应的正序控制器。根据上述控制器的设计过程可以得到图 3 所示的基于 Lyapunov 函数策略的正、负序控制器的结构框图。

3 仿真分析

为了验证所提控制策略的正确性和优越性,

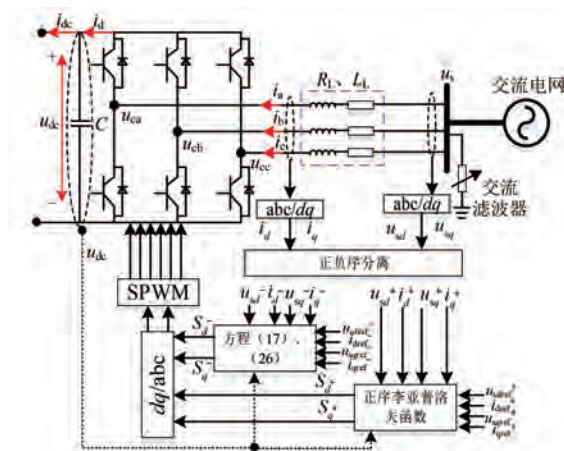


图3 受端 VSC 换流站控制系统结构框图

仿真在 MATLAB/Simulink 软件中搭建了图 1 所示的风电机组经 VSC-HVDC 送出系统的拓扑结构。其中,永磁同步发电机(PMSG)风机采用定功率模式,单台风机的参考有功功率设定为 5 MW,共有 60 台风机,输送 300 MW 功率。以下以单台风机的参数为例介绍仿真参数:空气密度设定为 1.225 kg/m^3 ,最大风能利用系数为 0.48,风机直径为 119.85 m,最佳叶尖速比为 8.1,风速设定为 11.46 m/s ;机侧换流器采用定有功功率控制,功率外环 PI 控制器的参数为 $k_p=0.0001$ 、 $k_i=0.02$,内环电流环的 PI 控制器参数为 $k_p=20$ 、 $k_i=200$;网侧换流器采用定直流电压和定无功功率控制,直流电压设定为 8 kV,参考无功功率设定为 0 var,外环定直流电压控制的 PI 控制器参数设定为 $k_p=5$ 、 $k_i=100$,外环定无功功率控制的 PI 控制器参数设定为 $k_p=0.00002$ 、 $k_i=0.0002$,内环均采用 PI 控制,参数设定为 $k_p=50$ 、 $k_i=100$;柔直送端环流站 VSC1 外环采用 VF 控制,控制器参数设定为 $k_p=0.5$ 、 $k_i=50$,内环 PI 控制器参数为 $k_p=0.5$ 、 $k_i=50$;柔直受端换流站 VSC2 采用定直流电压控制,直流电压设定为 300 kV,外环 PI 控制器参数为 $k_p=5$ 、 $k_i=100$,内环电流环采用本文所提的 Lyapunov 函数方法,系数 α_1 、 α_2 设定为 -0.001 ;柔直直流侧电容 C 设定为 0.002 F ,受端交流系统阻抗参数为 $R_L=75 \times 10^{-3} \Omega$ 、 $L_L=25 \times 10^{-3} \Omega$ 。以下将从稳态运行验证所提策略的正确性,从不对称故障对比验证所提策略的优越性。

3.1 稳态运行

为了验证所提策略的正确性,图 4 给出了系

统稳态运行时的仿真波形。其中,图 4(a)和(b)为 VSC-HVDC 系统直流电压和直流电流波形,图 4(c)和(d)为风电机组输出功率和 VSC-HVDC 系统输出功率波形图。由图 4 可知,直流电压数值约为 300 kV,与理论需求一致。风电机组输出有功功率约为 300 MW,与 VSC-HVDC 输送直流功率的数值基本一致。此外,由功率计算式可知,直流电流理论数值为 1 kA,与仿真数值基本一致。以上仿真结果验证了所提策略的正确性。

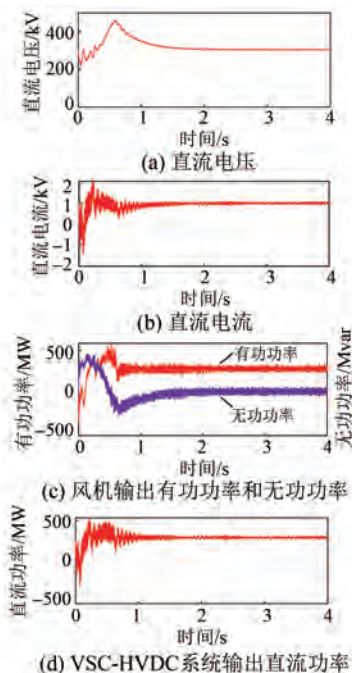


图4 稳态仿真波形

图 5 是 2 s 时风机风速发生变化时的仿真波形。其中,图 5(a)、(b)、(c)分别是是风机风速、直流电压以及直流电流波形图,图 5(d)、(e)分别是风电机组输出功率和 VSC-HVDC 系统输送直流功率波形图。由图 5 可知,仿真中设定 2 s 时风机风速骤然降低,VSC-HVDC 系统的直流电压出现短时波动后恢复至 300 kV,直流电流由于风电机组输出功率下降从而呈现递减趋势。另外,观察图 5(b)可知,风电机组输出功率发生变化时 VSC-HVDC 系统能够及时参与调整,验证了仿真模型的正确性。

3.2 不对称故障运行

为了验证所提策略在谐波抑制方面的优势,仿真将 Lyapunov 函数方法与传统 PI 控制策略进行对比。图 6 和图 7 分别给出了两种策略在单相

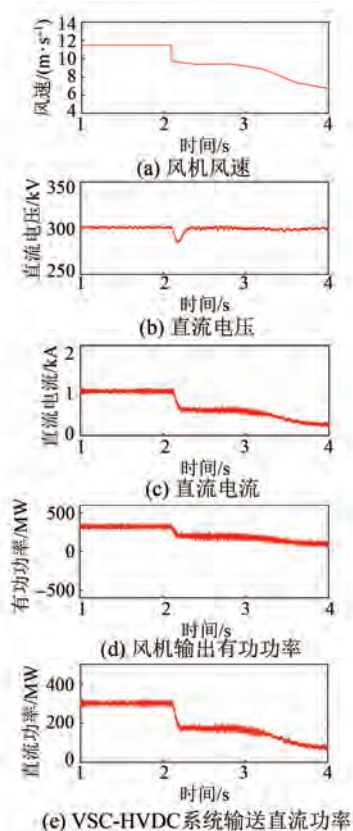


图5 2 s时风机风速变化时仿真波形

接地故障情况下受端 A 相电流、直流电流以及直流电压谐波。仿真中设定 2~3 s 时受端交流系统发生单相接地故障,以 2 s 为初始条件,20 个周期进行 FFT 分析。图 6 为 Lyapunov 函数策略仿真结果,由图 6 可知,单相接地故障条件下受端交流系统 A 相电流谐波为 128.18%,直流电流谐波为 23.64%,直流电压谐波为 66.85%。然而,PI 控制策略下受端交流系统 A 相电流谐波为 267.59%,直流电流谐波为 38.63%,直流电压谐波为 115.73%。比较上述两种策略的仿真结果可知,所提 Lyapunov 函数策略可以有效抑制单相接地故障情况下电气量的谐波。

图 8 和图 9 分别给出了两种策略在两相接地故障条件下的仿真波形。其中,图 8 为 Lyapunov 函数策略的仿真波形,图 9 为传统 PI 控制策略的仿真波形。由图 8 可知,两相接地故障条件下受端交流系统 A 相电流谐波为 20.47%,直流电流谐波为 33.12%,直流电压谐波为 153.85%。然而,图 9 中受端交流系统 A 相电流谐波为 23.94%,直流电流谐波为 46.30%,直流电压谐波为

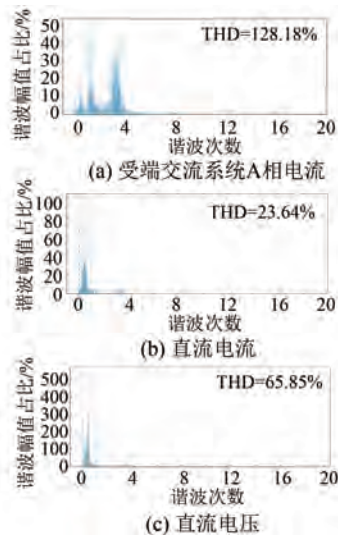


图6 单相接地故障情况下 Lyapunov 函数策略输出波形谐波

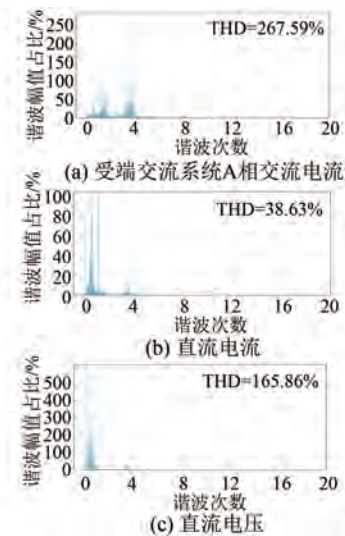


图7 单相接地故障情况下 PI 控制策略输出谐波

165.86%。以上仿真结果 Lyapunov 函数策略可以有效抑制两相接地故障条件下电气量的谐波。

为了更加直观地突出 Lyapunov 函数策略在谐波抑制方面的优势,表 1 给出了上述两种案例的仿真结果对比。由表 1 可知,所提策略抑制不对称故障条件下电气量的谐波效果较传统 PI 策略好。

4 结 语

本文着重探究了海上风电经 VSC-HVDC 送出系统中受端电网的不对称故障分析,并提出了一种基于 Lyapunov 函数策略的负序分量抑制策

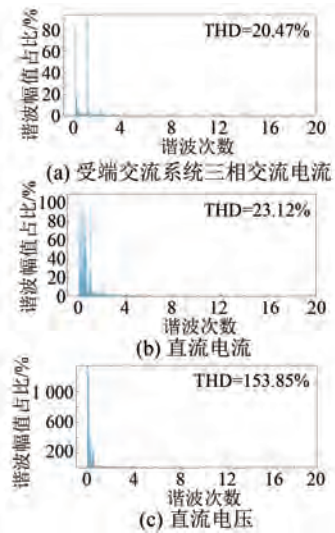


图8 两相接地故障情况下 Lyapunov 函数策略输出谐波

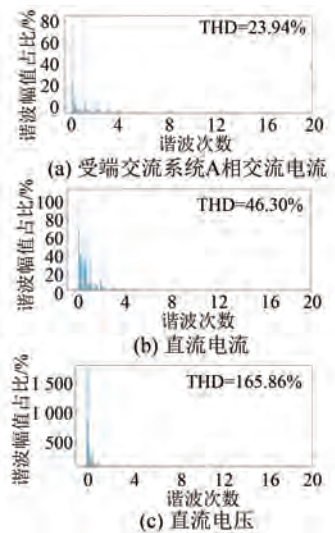


图9 两相接地故障情况下 PI 控制策略输出谐波

表1 两种策略的仿真对比 %

	Lyapunov 函数策略		传统 PI 策略	
	单相接地	两相接地	单相接地	两相接地
受端交流电流谐波	128.18	20.47	267.59	23.94
直流电流谐波	23.64	33.12	38.63	46.30
直流电压谐波	66.85	153.85	115.73	165.86

略,仿真验证了所提策略在谐波抑制方面的优势,可得出以下主要结论:

- (1) 受端交流系统发生不对称故障会在交流侧产生奇数次谐波,在直流侧产生偶数次谐波;
- (2) 所提 Lyapunov 函数策略较传统 PI 策略

抑制电压和电流的谐波效果好,尤其是单相接地故障条件下 Lyapunov 策略输出电压和电流的谐波约为传统 PI 策略的 1/2。

【参考文献】

[1] 冯煜尧,张开华,诸浩君,等. 海上双馈电机开路故障容错性能评估[J]. 电机与控制应用,2017,44(11): 111.

[2] 厉孟,谢桢,李长乐. 大容量直驱风电机组级联直流组网系统设计[J]. 电机与控制应用,2017,44(5): 46.

[3] 杨仁炘,张琛,蔡旭,等. 海上风电-柔直并网系统自同步电压源控制与电网故障穿越[J]. 中国电机工程学报,2022,42(13): 4823.

[4] 王英沛. 柔性多端直流对交流系统的故障穿越控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.

[5] 马世强,余利霞,郑连清. MMC-HVDC 交流侧不对称故障特性分析与保护策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2015,42(6): 35.

[6] 邱大强,李群湛,南晓强. 电网不对称故障下 VSC-HVDC 系统的直接功率控制[J]. 高电压技术,2012,38(4): 1012.

[7] 陈海荣,张静,屠卿瑞. 电网电压不平衡时电压源换流器型直流输电的负序电压补偿控制[J]. 高电压技术,2011,37(10): 2363.

[8] 王帆,刘一民,杨慧敏,等. 柔性直流输电并网建模及故障分析[J]. 控制工程,2020,27(7): 1293.

[9] 陈海荣. 交流系统故障时 VSC-HVDC 系统的控制与保护策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.

[10] 程启明,孙伟莎,程尹曼,等. 电网电压不平衡条件下 MMC 的基于 Lyapunov 函数非线性控制策略[J]. 高电压技术,2019,45(12): 3984.

[11] 程启明,李涛,张宇,等. 基于 Lyapunov 函数的 NPC 型三电平 SAPF 非线性控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(11): 143.

[12] 薛花,范月,王育飞. 基于李雅普诺夫函数的并联型混合有源电力滤波器非线性控制方法[J]. 电工技术学报,2016,31(21): 133.

[13] 闫家铭. 海上风电经柔直接入受端系统频率稳定控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.

[14] 武文强. 海上风电经柔性直流送出系统故障穿越控制方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2022.

[15] 程启明,李涛,程尹曼,等. 基于受控耗散 Hamiltonian 系统模型的光伏准 Z 源 T 型三电平并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(8):1718.

(下转第 84 页)

- 制技术研究综述[J]. 电源学报,2012(4): 1.
- [6] 郑晨,周林,张密. 基于导纳重构的大型光伏电站谐波谐振抑制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(8): 51.
- [7] 张兴,余畅舟,刘芳,等. 光伏并网多逆变器并联建模及谐振分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(3): 336.
- [8] 刘斌,谢积锦,李俊,等. 基于自适应比例谐振的新型并网电流控制策略[J]. 电工技术学报,2013,28(9): 186.
- [9] 张自雷,赵旭,杨培宏,等. 基于自适应占空比的光伏 MPPT 控制[J]. 电工技术,2021(22): 44.
- [10] 李振志,葛强,石建全,等. 基于模糊控制的光伏 MPPT 控制策略及仿真分析[J]. 电工技术,2022(5): 29.
- [11] 常潇,侯哲晖,刘翼肇,等. 基于改进动态下垂控制微网控制方法研究[J]. 电气传动,2022,52(2): 11.
- [12] 马州生,姚阳. 含海上风电场混合直流系统的稳定下垂控制[J]. 电气传动,2022,52(11): 35.

(上接第 77 页)

- [16] 郑黎明,贾科,毕天姝,等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(20): 20.
- [17] 李涛,程启明,程尹曼,等. 基于 E-L 模型的 Z 源 T 型逆变器无源控制策略研究[J]. 电网技术,2018,42(7): 2303.
- [18] 侯世英,曾建兴,孙韬,等. 基于李亚普诺夫稳定性分析的 APF 新型控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(10): 33.
- [19] MILANO F. Analogy and convergence of Levenberg's and Lyapunov-based methods for power flow analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1663.
- [20] BADRI V, TAVAZOEI M S. Non-uniform reducing the involved differentiators' orders and Lyapunov stability preservation problem in dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(4): 735.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发刊,邮发代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的

贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。近年还被 JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)和 Pж(AJ)文摘杂志(俄)等国外数据库收录。为及时刊载上述技术领域的最新研究动态,推广研发成果,推动研究与应用的紧密结合,欢迎各高校相关课题组及团队和科研技术人员等向本刊投稿,本刊不收取任何版面费或审稿费等费用!

《电机与控制应用》官网: <http://www.motor-abc.cn/djkyzy/home>.