

基于托里拆利点的柔性互联装置直流电压波动抑制策略

周琦,王晨清,孔祥平

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘要:针对柔性互联装置交流电网三相不平衡引发直流侧电压波动的问题,提出一种基于托里拆利点的柔性互联装置直流电压波动抑制策略。首先,通过定义三相不平衡不对称故障系统电压三角形托里拆利点为“新中性点”,将传统三相坐标系下的电压幅值不对称、相角漂移的故障转化为托里拆利点坐标系下的电压幅值故障;其次,通过分析系统三相功率有功功率振荡、直流波动之间的关系,建立新型控制策略,通过抑制有功功率二倍频分量波动,有效抑制系统直流母线电压波动。最后,基于 Matlab/Simulink 搭建仿真模型,验证了所提方法的正确性。

关键词:托里拆利点;柔性互联;不对称故障;电压波动

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25223

DC Voltage Fluctuation Suppression Strategy of Flexible Interconnected Device Based on Torricelli Point

ZHOU Qi, WANG Chenqing, KONG Xiangping

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Ltd. Electric Power Research Institute,
Nanjing 211103, Jiangsu, China)

Abstract: Considering that the problem of voltage fluctuations on the DC side caused by the three-phase imbalance of the AC grid of the flexible interconnection device, a DC voltage fluctuation suppression strategy for flexible interconnection device based on the Torricelli point was proposed. Firstly, by defining the Torricelli point of the triangle formed by the voltage vector in the three-phase unbalanced fault system as the "new neutral point", the voltage amplitude asymmetry and phase angle drift faults in the traditional three-phase coordinate system were transformed into voltage amplitude faults in the Torricelli point coordinate system; secondly, the relationship between the active power oscillation of the three-phase power system and DC fluctuations was analyzed, a new control strategy was established to suppress the voltage fluctuations of the DC bus voltage by suppressing the fluctuation of double frequency component of active power effectively. Finally, the proposed method was proved to be effective by the Matlab/Simulink simulation model.

Key words: Torricelli point; flexible interconnected; asymmetric failure; voltage fluctuation

随着分布式能源的渗透率的不断增加,电网的结构逐渐复杂化,且分布式发电具有一定的随机性,系统负载不对称导致交流电网不平衡及短路故障的概率大大增加^[1-4]。当柔性互联装置连接的交流电网出现三相不对称故障时,会产生负序或零序电流,与正序电压合成,导致不平衡电压的产生。不平衡电压导致功率二倍频波动的产生,从而引发直流侧电压出现二倍频的波动,影响柔性互联装置连接的另一侧交流电网。如

果不采用有效措施对电网电压不平衡进行抑制,会对电网电能质量造成一定程度的破坏,负载也会伴随着过流、过热甚至脱机烧毁等严重故障,导致系统中对电能质量要求高的设备处于异常运行状态^[5]。因此,潮流转供装置中电网不平衡控制问题的解决具有较大意义,必须要采取相应措施对这种情况加以抑制。

柔性互联装置在高压直流输电、新能源交直流混合输电等领域得到了广泛应用,能够将传统

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5400-202255160A-1-1-ZN)

作者简介:周琦(1992—),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为柔性直流输电、电力电子,Email:dianqizhouqi@163.com

多台区的交流配电网进行柔性互联,实现不同台区间的功率互济。相比传统物理开关的连接,其具有电力潮流调节、直流电压控制、故障恢复供电等功能,实现配电网的灵活、可靠运行^[6-8]。

针对三相不平衡导致的直流波动问题,文献[9]采用交叉解耦复数滤波器准确估计电网中的电压正序、负序分量,得到电流参考指令,实现系统功率波动抑制,进而实现直流电压波动抑制。文献[10]在传统的电网电压定向矢量控制方法中增加了基于PR的功率控制策略,抑制有功和无功功率波动。文献[11]采用比例积分-降阶调节器,对电流进行无差控制,实现不平衡电流控制。

本文针对柔性互联装置存在的交流电网出现三相不平衡故障后,直流侧电压产生波动,提出了一种基于托里拆利点的柔性互联装置直流电压波动抑制策略。首先对柔性互联装置的结构以及工作原理进行分析,分析交流电网三相不

平衡数学模型。通过将传统交流三相不对称故障转化为基于托里拆利点的电压幅值故障,简化控制复杂度,以实现柔性互联装置直流电压波动抑制。最后,基于Matlab/Simulink搭建柔性互联装置模型,设定故障工况进行仿真,验证所提调制策略的正确性。

1 系统托里拆利点的定义

1.1 托里拆利点坐标系的建立

柔性互联装置拓扑结构如图1所示,该系统由两个电压源型变流器组成,分别实现整流和逆变的功能。图1中, L_{1r}, C_r, L_{2r} 和 L_{1i}, C_i, L_{2i} 分别为两变流器模块的LCL滤波器;两台变流器模块的变流器侧电流分别记作 i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} 和 i_{ia}, i_{ib}, i_{ic} ;两台变流器的母线电压分别记为 $U_{bcmr}, U_{camr}, U_{abmr}$ 和 $U_{bcmi}, U_{camr}, U_{abmi}$; V_{up} 和 V_{dn} 为直流侧上下电容两端的电压。整流侧与逆变侧滤波模块通过隔离变压器与电网台区1和2相连接。

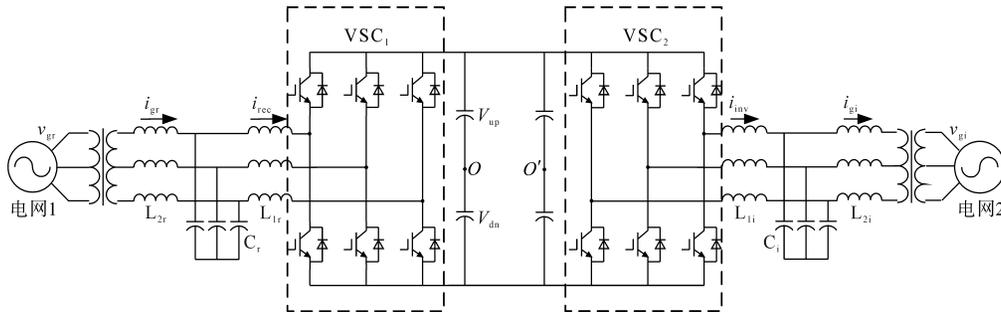


图1 柔性互联装置拓扑

Fig.1 Topology of flexible interconnection device

图2为托里拆利点坐标系示意图。根据数学推导可知,由此方式确定的托里拆利点 O_T 满足 $\angle AO_T B = \angle BO_T C = \angle CO_T A = 120^\circ$ 。以三相线电压构成的三角形 ΔABC 的三条边为边向外侧作等边三角形, AA', BB', CC' 的交点即为托里拆利点 O_T 。

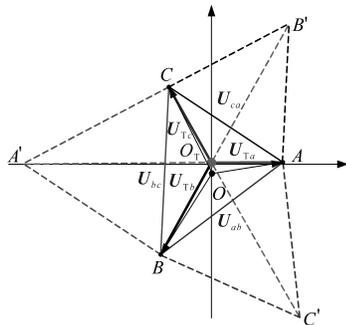


图2 托里拆利点坐标系示意图

Fig.2 The schematic diagram of the coordinate system of Torricelli point

图3为基于托里拆利点坐标系的故障电压向量图,将传统的三相静止坐标系中幅值不等、相角漂移的电网不对称故障转化为托里拆利点坐标系中的幅值不等的故障。

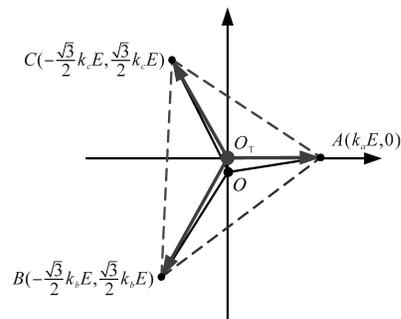


图3 托里拆利点坐标系下故障电压相量图

Fig.3 The fault voltage phasor diagram in the Torricelli point coordinate system

设柔性互联装置两台变流器的母线电压为 $U_{bcmr}, U_{camr}, U_{abmr}$ 和 $U_{bcmi}, U_{camr}, U_{abmi}$ 。计算托里拆

利坐标系下“新中性点”三相电压相量 $U_{Tar}, U_{Tbr}, U_{Ter}$ 和 $U_{Tai}, U_{Tbi}, U_{Tci}$, 计算公式如下:

$$\begin{cases} U_{Tax} = U_{Tamx} \angle 0^\circ \\ U_{Tbx} = U_{Tbmx} \angle -120^\circ \\ U_{Tcx} = U_{Tcmx} \angle 120^\circ \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{Tamx} = \frac{U_{camx}^2 + U_{bcmx}^2 - 2U_{bcmx}^2 + m_x^2}{3m_x} \\ U_{Tbmx} = \frac{U_{bcmx}^2 + U_{abmx}^2 - 2U_{camx}^2 + m_x^2}{3m_x} \\ U_{Tcmx} = \frac{U_{bcmx}^2 + U_{camx}^2 - 2U_{abmx}^2 + m_x^2}{3m_x} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$m_x = (U_{abmx}^2 + U_{bcmx}^2 + U_{camx}^2)/2 + 2\sqrt{3} S_x \quad (3)$$

式中: $U_{Tamx}, U_{Tbmx}, U_{Tcmx}$ 分别为托里拆利点坐标系下潮流转供装置交流电网三相相电压幅值, $x=r$ 为整流侧参数, $x=i$ 为逆变侧参数; S_x 为转化为托里拆利点坐标系下电压矢量所围成的三角形的面积。

S_x 的值由下式求得:

$$S_x = \sqrt{d_x(d_x - U_{bcmx})(d_x - U_{bcmx})(d_x - U_{abmx})} \quad (4)$$

$$\text{其中 } d_x = (U_{abmx} + U_{bcmx} + U_{camx})/2 \quad (5)$$

1.2 求解托里拆利点坐标系功率

本文以柔性互联装置逆变侧发生三相不对称故障为例进行研究。在托里拆利点坐标系下, 柔性互联装置逆变侧电网系统的瞬时有功功率、无功功率^[12]可表示为 p_{abc_T} 和 q_{abc_T} , 计算公式如下:

$$\begin{cases} p_{abc_T} = p_{Ta} + p_{Tb} + p_{Tc} = \mathbf{u}_{Ta} i_{ga} + \mathbf{u}_{Tb} i_{gb} + \mathbf{u}_{Tc} i_{gc} \\ q_{abc_T} = q_{Ta} + q_{Tb} + q_{Tc} = \mathbf{u}_{Ta\perp} i_{ga} + \mathbf{u}_{Tb\perp} i_{gb} + \mathbf{u}_{Tc\perp} i_{gc} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \begin{cases} \mathbf{u}_{Ta} = U_{Tam} \cos(\omega t) \\ \mathbf{u}_{Tb} = U_{Tbm} \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \mathbf{u}_{Tc} = U_{Tcm} \cos(\omega t + 120^\circ) \\ \mathbf{u}_{Ta\perp} = U_{Tam} \sin(\omega t) \\ \mathbf{u}_{Tb\perp} = U_{Tbm} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \mathbf{u}_{Tc\perp} = U_{Tcm} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{Ta\perp} = U_{Tam} \sin(\omega t) \\ \mathbf{u}_{Tb\perp} = U_{Tbm} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \mathbf{u}_{Tc\perp} = U_{Tcm} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_{gj} ($j=a, b, c$) 为柔性互联装置的三相电流瞬时值; \mathbf{u}_{Tx} 为托里拆利点转化后的三相相电压瞬时值; $\mathbf{u}_{Tx\perp}$ 为一组滞后于托里拆利点电压的电压矢量, 并且相角差为 90° 。

逆变侧三相电网基于传统有功功率瞬时值、无功功率瞬时值的计算如下式所示:

$$\begin{cases} p_{abc_O} = p_{Oa} + p_{Ob} + p_{Oc} = \mathbf{u}_{Oa} i_{ga} + \mathbf{u}_{Ob} i_{gb} + \mathbf{u}_{Oc} i_{gc} \\ q_{abc_O} = q_{Oa} + q_{Ob} + q_{Oc} = \mathbf{u}_{Oa\perp} i_{ga} + \mathbf{u}_{Ob\perp} i_{gb} + \mathbf{u}_{Oc\perp} i_{gc} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{u}_{Oa}, \mathbf{u}_{Ob}, \mathbf{u}_{Oc}$ 分别为托里拆利点坐标系下的三相电压; $\mathbf{u}_{Oa\perp}, \mathbf{u}_{Ob\perp}, \mathbf{u}_{Oc\perp}$ 为一组滞后于托里拆利点电压的电压矢量, 并且二者的相角差为 90° 。

联立式(6)与式(9), 可将柔性互联装置逆变侧三相电网不对称故障下, 基于托里拆利点坐标系下的有功功率的瞬时值转变为

$$\begin{aligned} p_{abc_T} &= \mathbf{u}_{Ta} i_{ga} + \mathbf{u}_{Tb} i_{gb} + \mathbf{u}_{Tc} i_{gc} \\ &= (\mathbf{u}_{TO} + \mathbf{u}_{Oa}) i_{ga} + (\mathbf{u}_{TO} + \mathbf{u}_{Ob}) i_{gb} + (\mathbf{u}_{TO} + \mathbf{u}_{Oc}) i_{gc} \\ &= \mathbf{u}_{Oa} i_{ga} + \mathbf{u}_{Ob} i_{gb} + \mathbf{u}_{Oc} i_{gc} + \mathbf{u}_{TO} (i_{ga} + i_{gb} + i_{gc}) \\ &= p_{abc_O} + \mathbf{u}_{TO} (i_{ga} + i_{gb} + i_{gc}) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: \mathbf{u}_{TO} 为托里拆利点 O_T 与传统中性点 O 之间的电压之差。

对于采用三相三线制的柔性互联装置, 存在三相电压和为0。将实际的三相电压转化至托里拆利点坐标系下后计算有功功率瞬时值, 其值等于传统中性点坐标系下的有功功率瞬时值, 无功功率的瞬时值同样满足这种关系, 即满足 $p_{abc_T} = p_{abc_O}$ 与 $q_{abc_T} = q_{abc_O}$ 。所以柔性互联装置逆变侧三相瞬时功率可直接通过计算基于托里拆利点坐标系下的瞬时有功、无功功率 p_{abc_T} 和 q_{abc_T} 得到。

以柔性互联装置的逆变侧A相为例, 在同一坐标系中表示传统中性点下的瞬时有功、无功功率 p_{a_O}, q_{a_O} 与托里拆利点下的瞬时有功、无功功率 p_{a_T}, q_{a_T} , 如图4所示。

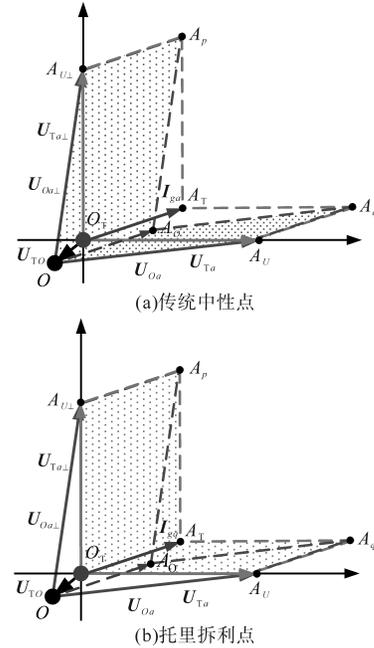


图4 传统中性点与托里拆利点坐标系功率计算示意图
Fig.4 Schematic diagram of the system power calculation in the coordinates of the traditional neutral point and the Torricelli point

由电压电流矢量与功率的几何关系,可得图4中阴影面积 $OA_{U_{\perp}}A_pA_o$, $OA_{U_{\perp}}A_qA_o$, $OT A_{U_{\perp}}A_pA_T$, $OT A_{U_{\perp}}A_qA_T$ 可表示A相瞬时功率 p_{a_o} , q_{a_o} , p_{a_T} , q_{a_T} 。且图中阴影部分面积满足: $S_{OA_{U_{\perp}}A_pA_o} = S_{OT A_{U_{\perp}}A_pA_T}$, $S_{OA_{U_{\perp}}A_qA_o} = S_{OT A_{U_{\perp}}A_qA_T}$ 。

2 直流电压波动机理

本文中,柔性互联装置与两侧电网台区通过隔离变压器连接,零序分量的通路无法形成,故本文仅考虑三相不对称故障发生时产生的正序、负序分量,而不考虑零序。柔性互联装置的瞬时电压 u_T 、滞后于托里拆利点瞬时相电压 90° 的电压 $u_{T\perp}$ 、瞬时输出电流 i_g 进行正负序分解的方法和不同电压电流变量对应的初始相位如下式所示:

$$\begin{cases} A_a = \underbrace{B^+ \cos(\omega t + m^+)}_{A_1^+} + \underbrace{B^- \cos(-\omega t + m^-)}_{A_1^-} \\ A_b = \underbrace{B^+ \cos(\omega t + m^+ - \frac{2}{3}\pi)}_{A_1^+} + \underbrace{B^- \cos(-\omega t + m^- - \frac{2}{3}\pi)}_{A_1^-} \\ A_c = \underbrace{B^+ \cos(\omega t + m^+ + \frac{2}{3}\pi)}_{A_1^+} + \underbrace{B^- \cos(-\omega t + m^- + \frac{2}{3}\pi)}_{A_1^-} \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} A = u_T & B = U, m = \theta \\ A = u_{T\perp} & B = U, m = \theta + \frac{\pi}{2} \\ A = i_g & B = I, m = \varphi \end{cases} \quad (12)$$

式中: ω 为电网角频率; U^+ , U^- , I^+ , I^- 分别为经过托里拆利转换后的电压、电流中正负序分量的幅值; θ^+ , θ^- , φ^+ , φ^- 分别为与电压和电流中正、负序分量对应的初始相角。

柔性互联装置逆变侧三相瞬时有功功率和无功功率计算公式如下式所示:

$$\begin{cases} p_{iabc_T} = \underbrace{u_{Tai} i_{gai}}_{p_{u,T}} + \underbrace{u_{Tbi} i_{gbi}}_{p_{u,T}} + \underbrace{u_{Tci} i_{gci}}_{p_{u,T}} \\ = p_{i0} + p_{i\cos 2} + p_{i\sin 2} \\ q_{iabc_T} = \underbrace{u_{Tai\perp} i_{gai}}_{q_{u,T}} + \underbrace{u_{Tbi\perp} i_{gbi}}_{q_{u,T}} + \underbrace{u_{Tci\perp} i_{gci}}_{q_{u,T}} \\ = q_{i0} + q_{i\cos 2} + q_{i\sin 2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $p_{i\sin 2}$, $p_{i\cos 2}$ 分别为有功功率中二倍频分量的正弦、余弦值; $q_{i\sin 2}$, $q_{i\cos 2}$ 分别为无功功率中二倍频分量中的正弦、余弦分量; p_{i0} , q_{i0} 分别为柔性互联装置逆变侧三相有功功率和无功功率中的直流分量。

根据系统的功率控制目标,联立式(11)~式(13)可得:

$$\begin{cases} p_0 = \sum_{j=a,b,c} p_{j_T} = \frac{3}{2} U^+ I^+ \cos(\theta^+ - \varphi^+) + \frac{3}{2} U^- I^- \cos(\theta^- - \varphi^-) = P_{ref} \\ q_0 = \sum_{j=a,b,c} q_{j_T} = \frac{3}{2} U^+ I^+ \sin(\theta^+ - \varphi^+) + \frac{3}{2} U^- I^- \sin(\theta^- - \varphi^-) = Q_{ref} \\ p_{\cos 2} = \cos 2\omega t [U^+ I^+ \cos(\theta^+ - \varphi^+) + U^- I^- \cos(\theta^- - \varphi^-)] \\ p_{\sin 2} = \sin 2\omega t [U^+ I^+ \sin(\theta^+ - \varphi^+) - U^- I^- \sin(\theta^- - \varphi^-)] \end{cases} \quad (14)$$

通过式(14)可知,柔性互联装置逆变侧三相有功功率和无功功率的二倍频波动是在电压电流正负序分量的乘积关系 $U^+ I^+$ 和 $U^- I^-$ 的作用下形成的。其中,瞬时无功功率的二倍频分量的波动不会对系统的正常工作产生不利影响。但瞬时有功功率的二倍频波动不仅对交流负载有不利影响,还会造成直流侧电压的波动,对系统的安全稳定运行留下隐患。

故为了实现抑制直流侧电压波动的目的,首先需要抑制交流侧瞬时有功功率的二倍频波动,即满足式(14)中 $p_{\cos 2} + p_{\sin 2} = 0$ 。所以需要系统的变量满足下式:

$$\begin{cases} U^+ I^+ \cos(\theta^+ - \varphi^+) + U^- I^- \cos(\theta^- - \varphi^-) = 0 \\ U^+ I^+ \sin(\theta^+ - \varphi^+) - U^- I^- \sin(\theta^- - \varphi^-) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

联立可得如下关系式:

$$\begin{cases} U^+ I^+ = U^- I^- \\ \theta^+ - \varphi^+ - (\theta^- - \varphi^-) = \pm \pi \end{cases} \quad (16)$$

或

$$\begin{cases} U^+ I^+ = U^- I^- \\ \theta^+ - \varphi^+ + (\theta^- - \varphi^-) = \pm \pi \end{cases} \quad (17)$$

式(16)、式(17)即为抑制柔性互联装置直流侧电压波动需满足的条件,只需满足其中任意一组,就能抑制系统有功功率二倍频波动,从而降低系统的直流电压波动。

3 直流电压波动抑制策略

本文提出一种基于托里拆利点坐标系的新型柔性互联装置直流侧电压波动抑制策略,柔性互联装置系统结构与控制结构如图5所示。

通过分析传统功率波动抑制策略中瞬时电

流与瞬时功率,在控制策略中直接设定将功率平均分配给三相系统,得到本文的闭环控制参考电流矢量。

三相电网的有功功率、无功功率的平均分配的计算公式如下:

$$\begin{cases} \frac{P_{\text{set}}}{3} = \frac{U_{T_{am}} I_{a_{pm}}}{2} = \frac{U_{T_{bm}} I_{b_{pm}}}{2} = \frac{U_{T_{cm}} I_{c_{pm}}}{2} \\ \frac{Q_{\text{set}}}{3} = \frac{U_{T_{am}} I_{a_{qm}}}{2} = \frac{U_{T_{bm}} I_{b_{qm}}}{2} = \frac{U_{T_{cm}} I_{c_{qm}}}{2} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{\text{set}}, Q_{\text{set}}$ 分别为柔性互联装置逆变侧控制的功率外环的PI调节后输出量; $I_{a_{pm}}, I_{b_{pm}}, I_{c_{pm}}$ 分别为三相电流有功分量幅值; $I_{a_{qm}}, I_{b_{qm}}, I_{c_{qm}}$ 分别为

三相电流无功分量幅值。

由式(18)得出柔性互联装置逆变侧的初始参考电流如下:

$$\begin{cases} I_{j_{pm}} = \frac{2P_{\text{set}}}{3U_{T_{jm}}} \\ I_{j_{qm}} = \frac{2Q_{\text{set}}}{3U_{T_{jm}}} \end{cases} \quad j = a, b, c \quad (19)$$

式中: $I_{j_{pm}}$ 为根据等比例功率分配得到的参考电流有功分量值; $I_{j_{qm}}$ 为根据等比例功率分配得到的参考电流无功分量值; $U_{T_{jm}}$ 为托里拆利点坐标系下相电压 u_{Tj} 幅值,也是与相电压相角相差 90° 的相电压正交量 $u_{Tj\perp}$ 的幅值($j = a, b, c$)。

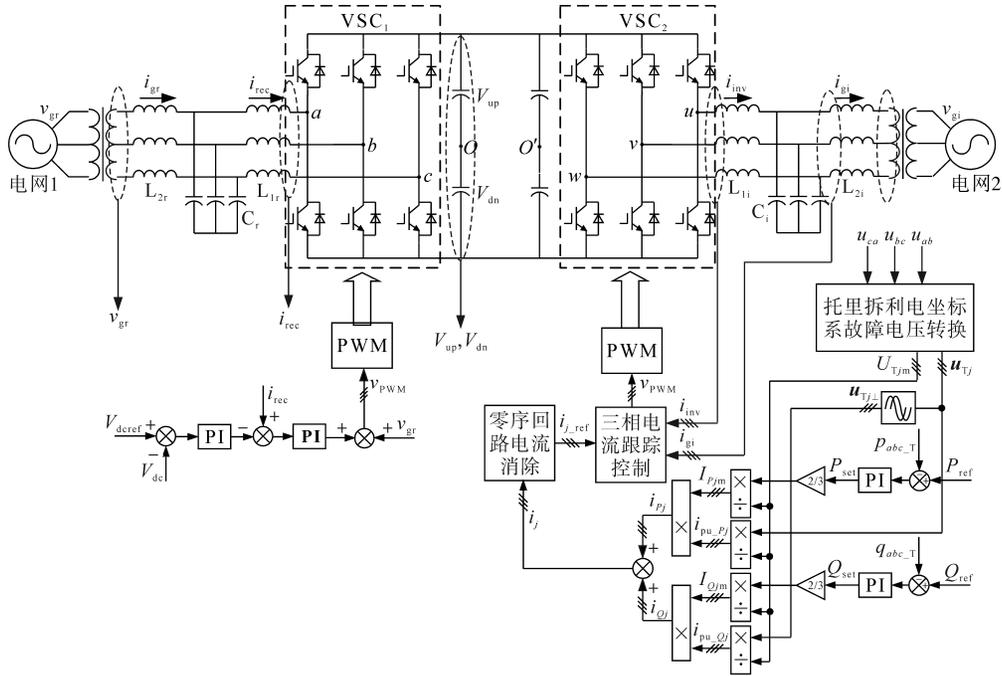


图5 系统总体控制框图

Fig.5 Control block diagram of the system

基于式(19)确定的三相初始参考电流的有功、无功分量的幅值,再利用经过托里拆利点坐标系转换的三相电压 u_{Tj} 和 $u_{Tj\perp}$ 相位,进行电流计算,得到三相参考电流 i_{j_v} ($j = a, b, c$),如下式所示:

$$\begin{aligned} i_{j_v} &= i_{p_{j_v}} + i_{q_{j_v}} \\ &= \frac{2P_{\text{set}} u_{Tj}}{3U_{T_{jm}}^2} + \frac{2Q_{\text{set}} u_{Tj\perp}}{3U_{T_{jm}}^2} \quad j = a, b, c \end{aligned} \quad (20)$$

但是采用这种方式合成的参考电流矢量 i_{j_v} 可能出现三相电流的和不等于0的情况,会导致零序电流的出现,故在参考电流矢量合成之后进行零序电流消除。对三相电流按照幅值比例进行各相消除,得到满足无零序电流的三相参考电流 $i_{j_{ref}}$ ($j = a, b, c$),具体消除如下式所示:

$$\begin{cases} i_{a_{ref}} = i_{a_v} - \frac{I_{a_{vm}}}{I_{a_{vm}} + I_{b_{vm}} + I_{c_{vm}}} (i_{a_v} + i_{b_v} + i_{c_v}) \\ i_{b_{ref}} = i_{b_v} - \frac{I_{b_{vm}}}{I_{a_{vm}} + I_{b_{vm}} + I_{c_{vm}}} (i_{a_v} + i_{b_v} + i_{c_v}) \\ i_{c_{ref}} = i_{c_v} - \frac{I_{c_{vm}}}{I_{a_{vm}} + I_{b_{vm}} + I_{c_{vm}}} (i_{a_v} + i_{b_v} + i_{c_v}) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $I_{j_{vm}}$ ($j = a, b, c$)为三相参考电流幅值。

将所得三相电流参考信号作为参考电流矢量,对柔性互联装置逆变侧进行定电流控制,得到调制参考电压信号,与载波比较后得到PWM脉冲信号,实现对柔性互联装置开关器件的控制。

4 仿真结果分析

为了验证本文所提出柔性互联装置直流侧电压波动抑制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 中搭建柔性互联装置电压源背靠背仿真模型。

对整流侧进行定直流电压控制,逆变侧使用传统方法以及本文所提方法进行控制,故障情况设定为发生三相不对称短路故障,有功功率给定为 120 kW, *b* 相电压增加至基准电压的 140%,相角偏移 $-\pi/5$, *c* 相电压跌落至基准电压的 60%,相角偏移 $\pi/10$ 。对本文所提出的控制策略与传统控制策略进行对比验证,表 1,表 2 为仿真所用的参数。

表 1 柔性互联装置仿真系统参数

Tab.1 Simulation system parameters of flexible interconnected device

系统参数	数值
电网电压(线电压 RMS)	380 V/50 Hz
滤波电感(L_{1x})	1 mH
滤波电容(C_x)	100 μ F
变流器侧滤波电感(L_{2x})	0.4 mH
电感及线路等效电阻(<i>R</i>)	0.02 Ω
直流侧电压(V_{dc})	750 V
直流电容(C_{dc})	1 200 μ F

表 2 柔性互联装置仿真控制参数

Tab.2 Simulation control parameters of flexible interconnected device

控制参数	数值
开关频率	5 kHz
PI 控制器比例系数	$k_p = 0.2 \text{ rad/A}$ $k_{p_0} = 0.01 \text{ rad/A}$
PI 控制器比例系数	$k_i = 100 \text{ rad/(A}\cdot\text{s)}$ $k_{i_0} = 0.001 \text{ rad/(A}\cdot\text{s)}$

图 6 为三相电网对称与发生不对称故障时的仿真。在 0 s—0.1 s 时,电网三相电压处于平衡状态,未发生电网不对称故障,瞬时有功、无功功率无波动,直流测电压波动较小。0.1 s 时刻,发生三相不对称短路故障, *b* 相电压增加至基准电压的 140%, *c* 相电压跌落至基准电压的 60%,未采用本文所提出的控制策略时,系统存在明显的瞬时有功功率波动,直流电压波动剧烈。

图 7 为三相电网不对称故障采用本文所提方法的仿真波形图,0.1 s—0.2 s 与图 6 中一致,为三相电网不对称情况,存在有功功率以及直流电压的波动。0.2 s 时刻加入本文所提出的控制策略,有功功率二倍频振荡得到有效抑制,直流母线电压波动显著降低,结果证明了本文所提策略的有效性。

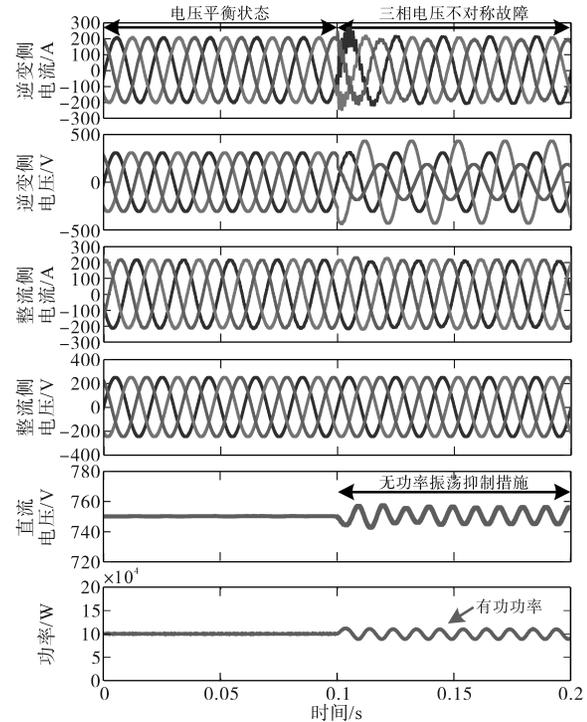


图 6 基于传统控制的三相对称与不对称电网仿真波形图

Fig.6 The simulation diagram of three-phase symmetrical and asymmetric grid based with traditional control

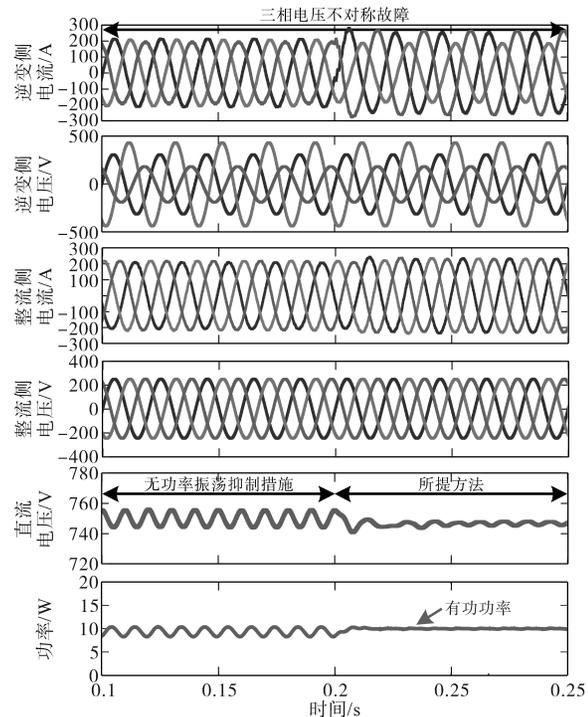


图 7 基于传统控制和本文所提控制的电网三相不对称仿真波形图

Fig.7 The simulation diagram of asymmetric three-phase power grid based with traditional control and the control proposed in this paper

5 结论

本文针对柔性互联装置的三相不对称造成

直流侧波动的问题,提出一种基于托里拆利点的直流侧电压波动抑制方法。该方法利用托里拆利点将传统电压幅值不等、相角漂移的三相不对称故障转化为电压幅值不等的故障,降低了基于传统中性点电压变量的控制的复杂度,实现了三线不平衡故障的简化。通过与传统控制方法进行对比,本方法有效抑制了直流侧电压波动与有功功率的二倍频波动,结果验证了本文所提方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191. ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [2] 张勇军,刘子文,邓丰强.柔性互联配电网研究现状综述及其发展探索[J].广东电力,2020,33(12):3-13. ZHANG Yongjun, LIU Ziwen, DENG Fengqiang. Review on research status and development of flexible interconnect distribution networks[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 3-13.
- [3] 任昭颖,刘科研,孟晓丽,等.低压交直流配电网柔性互动系统研究及应用展望[J].电力信息与通信技术,2022,20(3):1-11. REN Zhaoying, LIU Keyan, MENG Xiaoli, et al. Research and application prospect of flexible interchange system for low voltage AC/DC distribution network[J]. Electric Power Information and communication, 2022, 20(3): 1-11.
- [4] 贾宏杰,穆云飞,侯恺,等.能源转型视角下城市能源系统的形态演化及运行调控[J].电力系统自动化,2021,45(16):49-62. JIA Hongjie, MU Yunfei, HOU Kai, et al. Morphology evolution and operation regulation of urban energy system from perspective of energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 49-62.
- [5] 李培宜,陈贻鹭.三相不平衡对功率振荡的影响[J].自动化应用,2023,64(8):53-55. LI Peiyi, CHEN Yi'ao. Influence of three-phase unbalance on power oscillation[J]. Automation Application, 2023, 64(8): 53-55.
- [6] 祁琪,姜齐荣,许彦平.智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J].电网技术,2020,44(12):4664-4676. QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [7] 王成山,季节,冀浩然,等.配电系统智能软开关技术及应用[J].电力系统自动化,2022,46(4):1-14. WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems Press, 2022, 46(4): 1-14.
- [8] 范朕宇,苏强,张新民,等.柔性多状态开关的改进控制策略研究[J].电气传动,2022,52(13):27-34. FAN Zhenning, SU Qiang, ZHANG Xinmin, et al. Study on improved control strategy of flexible multi-state switch[J]. Electric Drive, 2022, 52(13): 27-34.
- [9] 郭小强,邹伟扬,漆汉宏.电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J].中国电机工程学报,2013,33(3):22-28,19. GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 22-28, 19.
- [10] 王萌,夏长亮,宋战锋,等.不平衡电网电压条件下PWM整流器功率谐振补偿控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(21):46-53. WANG Meng, XIA Changliang, SONG Zhanfeng, et al. A power resonance compensation control strategy for PWM rectifiers under unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21): 46-53.
- [11] 赵新,金新民,周飞,等.基于比例积分-降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制[J].中国电机工程学报,2013,33(19):84-92. ZHAO Xin, JIN Xinmin, ZHOU Fei, et al. Unbalanced control of grid-connected inverters based on proportion integral and reduced order resonant controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 84-92.
- [12] AKAGI H, WATANABE E H, AREDES M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning[M]. Piscataway: IEEE Press-Wiley InterScience, 2007.
- [13] 王逸超,罗安,金国彬.微网逆变器的不平衡电压补偿策略[J].中国电机工程学报,2015,35(19):4956-4964. WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin. An unbalanced voltage compensation method for parallel inverters in microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4956-4964.
- [14] 卢宇,吴小丹,雷家兴,等.电网不平衡工况下模块化多电平矩阵变换器控制策略[J].电力工程技术,2023,42(4):195-205. LU Yu, WU Xiaodan, LEI Jiaying, et al. Control strategy of the modular multilevel matrix converter under unbalanced grid condition[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 195-205.
- [15] 孙志鹏,陶顺.基于电流相位估计的三相不平衡条件下配变损耗计算[J].电力工程技术,2020,39(3):114-119. SUN Zhipeng, TAO Shun. Calculation of distribution loss under three-phase unbalance based on current phase estimation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 114-119.