

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.007

电网故障时基于 MMC-PET 接口风力发电系统的建模与控制

程启明¹, 孙英豪¹, 程尹曼², 张磊², 渠博岗¹(1. 上海电力大学自动化工程学院(上海市电站自动化技术重点实验室),
上海 200090; 2. 国网上海市电力公司市北供电公司, 上海 200041)

摘要:近年来,电力电子变压器(power electronic transformer, PET)作为电网接口的风能转换系统,无需额外的无功补偿器便可有效地抑制由风能暂态特性引起的电压波动,引起了广泛关注。但采用传统的 PET 结构在电网发生故障时难以控制,当电网处于不平衡时会使得控制难度进一步增加,且难以保证系统的动态性能。因此,为提升系统动态性能,增强系统的故障穿越能力,文中提出一种基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)型 PET 的新型风能转换系统的结构与控制策略。首先,文中根据系统故障时的工作状态设计基于无源滑模控制的故障切换控制策略,采用具有斩波保护功能的子模块以及时疏解故障功率;其次,利用软件仿真和半实物仿真实验平台选取典型工况对系统进行详细的模拟研究;最后,将应用文中控制策略的新型风力发电系统与传统的风力发电系统进行对比实验,实验验证了采用文中控制策略的新型系统结构具有无功功率补偿、有效限制故障时子模块电压升高和改善电能质量等优点,且满足故障条件下电网运行的最新要求,具有优秀的故障穿越能力。

关键词:模块化多电平换流器(MMC);电力电子变压器(PET);风电并网接口;风力发电系统;无源滑模控制;故障穿越

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)06-0064-14

0 引言

在过去十年中,可再生能源在电力系统中的渗透率一直稳步提高,特别是风能装机增长迅速,全球装机容量从 2012 年的 296 GW 增加到 2022 年的 837 GW^[1]。在现有的用于风能转换系统(wind energy conversion systems, WECS)的众多技术中,直驱式发电机和双馈感应发电机(doubly fed induction generators, DFIG)是目前 2 种主流的风力发电系统^[2-4]。后者由于拥有高功率密度和较低成本等优势,目前在风力发电市场中占据了更高的份额,而如何解决由电能质量发生变化引起的双馈风力发电机异常工作甚至脱网的问题,也引起越来越多专家的关注与研究。

当前风力发电系统主要采用传统的工频变压器进行并网。传统变压器拥有构造简单、抗冲击性强和可靠性高等优势。但是,传统变压器的功能较为单一,仅可实现不同等级交流电压的转换和电气隔离,且具有体积、质量较大的缺点。此外,传统变压器内的绝缘液体可能造成环境污染,且不利于维护,无法有效隔离负载侧的故障,在传统变压器铁芯饱和时可能引发较大的励磁涌流等。风电场所需的传统工频变压器需要特殊的继电保护设置和更高的结构设计强度。为替换风力发电系统中体

积庞大的传统变压器,学者们提出了一些新型电力变压器^[5-7],其中电力电子变压器(power electronic transformer, PET)因其可控性高、端口配置灵活、交直流接口兼容、多功能集成等特点,将在未来电网系统中发挥重要作用。文献[8]首次提出了将 PET 接入风力发电系统,并通过仿真实验论证了该系统配置可以同时实现有功功率传输、无功功率补偿和电压变换;文献[9]提出了一种新型的半桥子模块,解决了传统半桥子模块在发生直流短路故障时无法闭锁的问题,可以实现有效的故障清除功能;文献[10]基于改进电流转移技术提出了一种新型子模块连接方式并将其应用于风能发电系统,通过改进电流转移以及阻断直流故障使系统可以吸收故障功率,提高风电机组的低电压穿越能力,但其电力电子元件的增多使工程成本有较为明显的增加;文献[11]提出了一种基于 PET 的 DFIG 风力发电系统,并通过仿真验证了 PET 的无功补偿功能;文献[12]提出了一种基于储能系统的扭振抑制方法,但可能会导致直流侧母线电压升高,从而对换流器的稳定运行造成威胁;文献[13-14]提出了一种在转子闭环控制外增加虚拟阻抗和改变系统阻尼系数的励磁控制策略,可在电网电压升高时有效抑制电磁转矩振荡和转子电流增大等,但可能会使转子侧电压进一步升高,从而破坏绝缘层;文献[15]提出了可以有效抑制定、转子侧负序电流振荡,并采用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)

收稿日期:2024-01-13;修回日期:2024-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62303301)

缩短响应时间的方法,其适用于串联网侧换流器的 DFIG 系统的低电压穿越策略,但会使得 DFIG 系统的电路拓扑和控制策略更为繁琐,不利于工程实现;文献[16]首次提出了将 PET 输出级作为 DFIG 系统中的网侧换流器,验证了 PET 作为接口的可行性与经济性,但并未研究新型风能发电系统的故障穿越策略。

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)型 PET 的拓展相较于传统 PET 更为简单,并且可以抑制谐波的产生和降低系统滤波要求^[17-18];同时当输入侧使用低电压等级的电力电子器件进行级联时,还可以增加单位时间内的元器件等效开关频率,具备提高高压直流侧输出的电能质量、减少电力电子开关器件数量和高频变压器数量等优点^[19]。综合上述优点,文中首先提出使用 MMC-PET 作为 DFIG 向电网输送电能的接口,将 PET 输出级与 DFIG 的网侧换流器相结合,使得系统结构更为简单。其次,通过仿真实验,研究设计了一种基于无源滑模控制(passivity-based sliding-mode control, PB-SMC)的故障切换控制策略,同时采用了具有斩波保护功能的子模块。保护模块有效限制了高压直流母线电压的波动,相较于传统的比例积分(proportional-integral, PI)控制,使用文中控制策略可以更精确地对电压、电流和功率进行控制,因此具有较好的故障穿越能力。最后,通过在实验中设置电网故障的典型工况,将文中系统控制效果与传统的风力发电系统进行对比,以验证文中

系统结构的稳定性和优越性;通过实验验证了采用文中策略的系统具有无功功率补偿、有效限制故障时子模块电压升高和改善电能质量等优点,且满足故障条件下电网运行的最新要求,具有优秀的故障穿越能力。

1 系统结构和建模以及网侧换流器建模

1.1 新型风电并网系统结构

2 种不同接口的风力发电系统配置如图 1、图 2 所示。

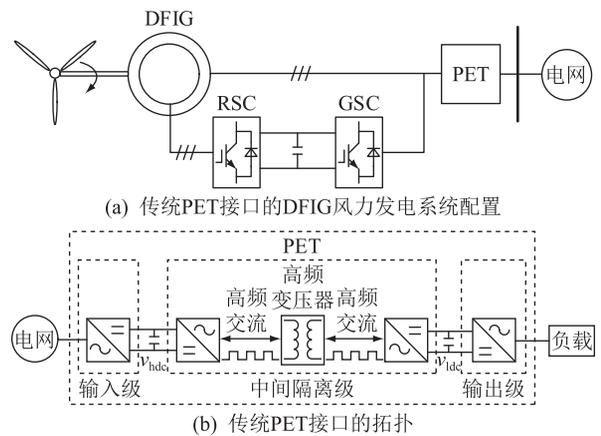


图 1 传统 PET 接口的 DFIG 风力发电系统配置及拓扑
Fig.1 Traditional PET interface configuration and topology for DFIG wind power systems

图 1(b)为风力发电系统中 PET 一般采用的三级式结构,其中 GSC 为网侧换流器; v_{hdc} 、 v_{ldc} 分别为高压和低压直流母线电压。图 2 为文中使用的新型

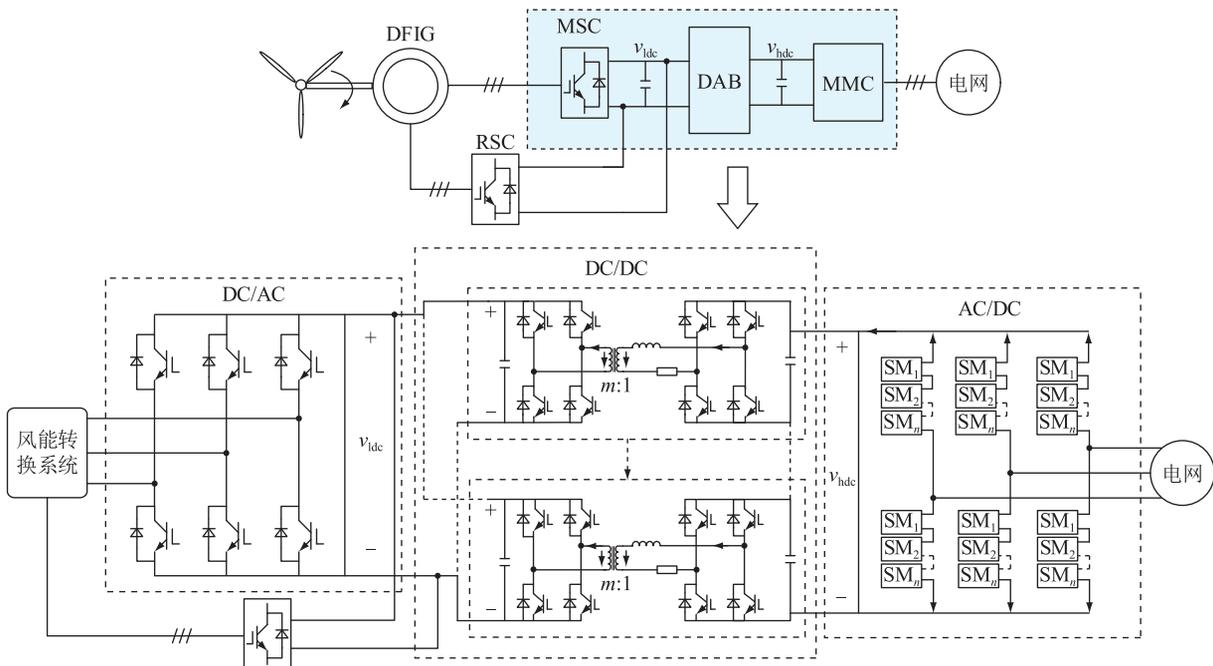


图 2 基于 MMC-PET 接口的新型 DFIG 风力发电系统配置

Fig.2 MMC-PET interface configuration for new type DFIG wind power systems

系统配置,其包含多个变比为 $m:1$ 的双向主动全桥 (dual active bridge, DAB) 与转子侧换流器 (rotor side converter, RSC)。由图可见,文中的新型系统配置将 PET 输出侧与传统 DFIG 的网侧换流器相结合,将 PET 靠近 DFIG 侧的转换器称为机器侧换流器 (machine side converter, MSC), 两侧变换器的结合使得系统结构进一步简化。一方面,这种新型结构可以在电网电压发生变化时,为 DFIG 提供稳定的直流母线电压;另一方面,MMC 可以在风速较低时为电网提供一定的无功功率,且在高频率、高效率密度情况下 MMC-PET 的体积预计比传统的工频变压器缩小约 25%^[20]。因此,使用 MMC-PET 作为电网接口有望进一步减少风力发电系统的重量和体积。

1.2 不平衡电网下网侧换流器数学模型建立

DFIG 网侧换流器为 MMC,其基本拓扑如图 3 所示。各相单元均由 2 个结构相同的桥臂构成,且每个桥臂都含有 n 个结构相同的子模块以及 1 个桥臂电感^[21]。图 3 中, u_{gj} 、 i_{gj} 分别为 j 相电网电压、电网电流 ($j=a, b, c$); u_j 为 j 相网侧换流器电压; C_c 、 C_{sm} 分别为保护模块电容与子模块电容; L_c 为保护模块电感; i_{dc} 为高压直流侧电压; T_1 、 T_2 为子模块绝缘栅双极晶体管 (insulate gate bipolar transistor, IGBT) 开关; R_g 、 L_g 分别为网侧等效电阻、电感; R_b 、 L_b 分别为桥臂电阻、电感; u_{pk} 、 i_{pk} 分别为上桥臂 k 相的电压、电流; u_{nj} 、 i_{nj} 分别为下桥臂 j 相的电压、电流 ($j, k=a, b, c$ 且 $j \neq k$)。

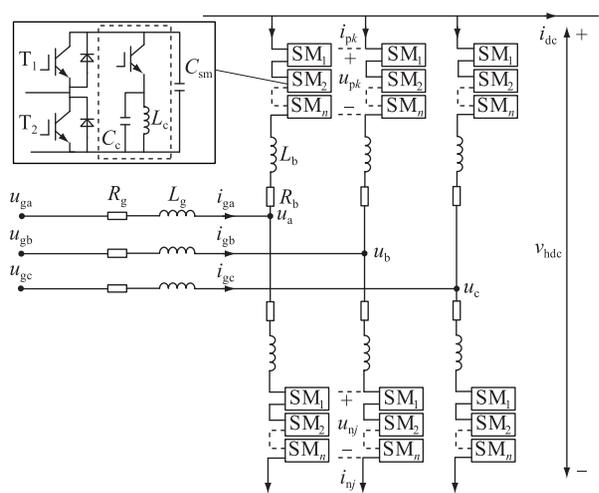


图 3 MMC 典型拓扑

Fig.3 Typical topology of MMC

子模块是 MMC 的基本构件也是其重要的组成部分。考虑到传统拓扑的半桥子模块构建简单、元器件数量要求较小且能量损耗较少,文中选用了具有斩波保护功能的半桥结构。

由基尔霍夫电压定理可得 MMC 的数学模

型为:

$$\begin{cases} e_a = u_a - \left(L_g + \frac{L_b}{2} \right) \frac{di_{ga}}{dt} - \left(R_g + \frac{R_b}{2} \right) i_{ga} \\ e_b = u_b - \left(L_g + \frac{L_b}{2} \right) \frac{di_{gb}}{dt} - \left(R_g + \frac{R_b}{2} \right) i_{gb} \\ e_c = u_c - \left(L_g + \frac{L_b}{2} \right) \frac{di_{gc}}{dt} - \left(R_g + \frac{R_b}{2} \right) i_{gc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: e_j 为网侧 j 相交流电压的数学模型。

当电网不平衡运行时,会存在电流和电压的负序分量,故以正序为例(负序同理),在同步旋转坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} \left(L_g + \frac{L_b}{2} \right) \frac{di_d^+}{dt} = u_d^+ - \left(R_g + \frac{R_b}{2} \right) i_d^+ + \omega \left(L_g + \frac{L_b}{2} \right) i_q^+ - e_d^+ \\ \left(L_g + \frac{L_b}{2} \right) \frac{di_q^+}{dt} = u_q^+ - \left(R_g + \frac{R_b}{2} \right) i_q^+ + \omega \left(L_g + \frac{L_b}{2} \right) i_d^+ - e_q^+ \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d^+ 、 u_q^+ 分别为公共耦合点电压在旋转坐标系中的正序 d 、 q 轴分量; i_d^+ 、 i_q^+ 分别为网侧电流的正序 d 、 q 轴分量; ω 为公共耦合点电压基波角频率; e_d^+ 、 e_q^+ 分别为三相电压在旋转坐标系下的正序 d 、 q 轴分量。

2 文中新型系统配置的控制策略

为确保文中新型系统配置的平稳运行,下面将对系统各控制器的控制目标和算法进行具体的分析和讨论。文中新型系统的完整控制框图包括 MMC 部分、中间隔离级(即 DAB)部分、RSC 部分和 MSC 部分的控制结构。

2.1 MMC 的控制策略

当电网发生故障时,系统为保证高压直流侧电压稳定可控,需要采用双环控制策略,即外环采用定直流电压控制策略、内环采用文中提出的 PB-SMC 策略,而内环参考值由外环输出提供^[22]。无源控制 (passivity-based control, PBC)^[23-24] 基于系统能量函数,在预先分配的能量之余附加一定的阻尼,通常用于稳定电力系统的频率和电压,对系统参数依赖性高。在复杂工况下,系统所受外部干扰更强,某些系统参数可能会随之变化,此时仍采用单一的 PBC 会出现因内部变化和外部扰动而发生动态特性变差的现象,因此文中提出了将 PB-SMC 策略用于 MMC 的内环电流控制,从而使得 MMC 系统在对称和非对称故障的条件下均可具有好的稳

定性。

基于欧拉-拉格朗日 (Euler-Lagrange, EL) 模型建立 PBC 策略。对于 MMC 系统的分析如下。

在电网电压不平衡时, 设正、负序内环电流的期望平衡点分别为:

$$\begin{cases} (\mathbf{x}^+)^* = \begin{bmatrix} i_{dref}^+ \\ i_{qref}^+ \end{bmatrix} \\ (\mathbf{x}^-)^* = \begin{bmatrix} i_{dref}^- \\ i_{qref}^- \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{x}^+ 、 \mathbf{x}^- 分别为正、负序的状态向量; i_{dref}^+ 、 i_{dref}^- 、 i_{qref}^+ 、 i_{qref}^- 分别为正、负序 d 、 q 轴电流的期望平衡点。

此时, 正、负序状态变量误差分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_e^+ = \mathbf{x}^+ - (\mathbf{x}^+)^* \\ \mathbf{x}_e^- = \mathbf{x}^- - (\mathbf{x}^-)^* \end{cases} \quad (4)$$

因此, 可将式(2)写为 EL 模型形式:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}}^+ + \mathbf{J}^+ \mathbf{x}^+ + \mathbf{R}\mathbf{x}^+ = \mathbf{u}^+ \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}}^- + \mathbf{J}^- \mathbf{x}^- + \mathbf{R}\mathbf{x}^- = \mathbf{u}^- \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{M} 为储能矩阵(正定); \mathbf{J}^+ 、 \mathbf{J}^- 分别为正、负序的互联矩阵(反对称); \mathbf{R} 为半正定的耗散矩阵; \mathbf{u}^+ 、 \mathbf{u}^- 分别为正、负序的输入向量。

考虑有 m^* 输入 m^* 输出的系统为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}) \end{cases} \quad \mathbf{x}(0) \in \mathbf{R}^{n^*} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{n^*}$ 为状态向量; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^{m^*}$ 为输入向量; $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^{m^*}$ 为输出向量; $f(\cdot)$ 为关于 (\mathbf{x}, \mathbf{u}) 局部 Lipschitz 的函数; $\mathbf{x}(0)$ 为状态向量中的初始向量。

对于式(6)系统, 如果存在半正定的储存函数 $H(\mathbf{x})$ 和正定函数 $Q(\mathbf{x})$ 满足式(7)或式(8)所示关系, 则系统是严格无源的。

$$H(\mathbf{x}(t)) - H(\mathbf{x}(0)) \leq \int_0^t \mathbf{y}^T \mathbf{u} d\tau - \int_0^t Q(\mathbf{x}) d\tau \quad (7)$$

$$dH(\mathbf{x})/dt \leq \mathbf{y}^T \mathbf{u} - Q(\mathbf{x}) \quad (8)$$

式中: τ 为单位时间内系统储存的能量。

由式(7)和式(8)可推出文中 MMC 的能量储存函数配置为:

$$H(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{M} \mathbf{x} / 2 \quad (9)$$

对式(9)求导后可得:

$$\dot{H}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^T (\mathbf{u} - \mathbf{J} \mathbf{x} - \mathbf{R} \mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{u} - \mathbf{x}^T \mathbf{R} \mathbf{x} \quad (10)$$

对 MMC 系统分别选取正、负序的能量储存函数为:

$$\begin{cases} V^+(\mathbf{x}) = (\mathbf{x}^+)^T \mathbf{M} \mathbf{x}^+ / 2 \\ V^-(\mathbf{x}) = (\mathbf{x}^-)^T \mathbf{M} \mathbf{x}^- / 2 \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)进行微分可得:

$$\begin{cases} \dot{V}^+(\mathbf{x}) = (\mathbf{x}^+)^T \mathbf{u}^+ - (\mathbf{x}^+)^T \mathbf{R} \mathbf{x}^+ \\ \dot{V}^-(\mathbf{x}) = (\mathbf{x}^-)^T \mathbf{u}^- - (\mathbf{x}^-)^T \mathbf{R} \mathbf{x}^- \end{cases} \quad (12)$$

由式(5)可知, \mathbf{J} 为反对称矩阵, 所以 $(\mathbf{x}^+)^T \mathbf{J}^+ \mathbf{x}^+ = 0$ 、 $(\mathbf{x}^-)^T \mathbf{J}^- \mathbf{x}^- = 0$, 于是可将 $\mathbf{y} = \mathbf{x}^+$ 、 $Q(\mathbf{x}) = (\mathbf{x}^+)^T \mathbf{R} \mathbf{x}^+$, 化简后可知其满足耗散不等式:

$$\dot{H}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{u}^T \mathbf{y} - Q(\mathbf{x}) \quad (13)$$

式(13)说明在电网电压不平衡时, MMC 满足严格无源, 由此可知 MMC 可以采用 PBC, 且 MMC 是可控稳定的^[25]。由于 MMC 是复杂的非线性系统, 为了提升系统的控制效果, 使用积分滑模替代传统的线性滑模, 选取滑模面如下:

$$\begin{cases} s_1 = k_{p1} e_1 + k_{i1} \int e_1 \\ s_2 = k_{p2} e_2 + k_{i2} \int e_2 \\ s_3 = k_{p3} e_3 + k_{i3} \int e_3 \\ s_4 = k_{p4} e_4 + k_{i4} \int e_4 \end{cases} \quad (14)$$

式中: k_{pi} 、 k_{ii} 分别为滑模面 s_i 的比例、积分系数, $i = 1, 2, 3, 4$; e_i 为滑模面 s_i 的系统误差。

$$\begin{cases} e_1 = i_d^+ - i_{dref}^+ \\ e_2 = i_q^+ - i_{qref}^+ \\ e_3 = i_d^- - i_{dref}^- \\ e_4 = i_q^- - i_{qref}^- \end{cases} \quad (15)$$

式中: i_d^- 、 i_q^- 分别为网侧电流的负序 d 、 q 轴分量。

为了削减滑模控制 (sliding-model control, SMC) 的抖振问题, 选取饱和函数 $\text{sat}(s)$ 来替代符号函数 $\text{sign}(s)$:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\varepsilon_1 \text{sat}(s_1) - k_1 s_1 \\ \dot{s}_2 = -\varepsilon_2 \text{sat}(s_2) - k_2 s_2 \\ \dot{s}_3 = -\varepsilon_3 \text{sat}(s_3) - k_3 s_3 \\ \dot{s}_4 = -\varepsilon_4 \text{sat}(s_4) - k_4 s_4 \end{cases} \quad (16)$$

式中: ε_i 、 k_i 为趋近率系数, 且 $\varepsilon_i > 0$, $k_i > 0$ 。

由不平衡电网下的数学模型可以推得其正序 PBC、SMC 的控制律分别为:

$$\begin{cases} e_d^+ = u_d^+ + \omega L_{eq} i_q^+ - R_{eq} i_{dref}^+ + R_{a1}^+ (i_d^+ - i_{dref}^+) \\ e_q^+ = u_q^+ - \omega L_{eq} i_d^+ - R_{eq} i_{qref}^+ + R_{a2}^+ (i_q^+ - i_{qref}^+) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} e_d^+ = u_d^+ + \omega L_{eq} i_q^+ - R_{eq} i_d^+ + L_{eq} \varepsilon_1 \text{sat}(s_1) + L_{eq} k_1 s_1 \\ e_q^+ = u_q^+ - \omega L_{eq} i_d^+ - R_{eq} i_q^+ + L_{eq} \varepsilon_2 \text{sat}(s_2) + L_{eq} k_2 s_2 \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$\begin{cases} L_{eq} = L_g + L_b/2 \\ R_{eq} = R_g + R_b/2 \end{cases} \quad (19)$$

式中： R_{a1}^+ 、 R_{a2}^+ 为控制器正序注入的阻尼。

将 PBC 与 SMC 两者结合，即将式(18)减去式(17)后代入式(17)中，可得正序的 PB-SMC 的内环控制器控制律为：

$$\begin{cases} e_d^+ = u_d^+ + \omega L_{eq} i_q^+ - R_{eq} i_{dref}^+ + \\ \frac{L_{eq} \varepsilon_1 R_{a1}^+}{R_{eq} + R_{a1}^+ - L_{eq} k_1} \text{sat}(i_d^+ - i_{dref}^+) \\ e_q^+ = u_q^+ - \omega L_{eq} i_d^+ - R_{eq} i_{qref}^+ + \\ \frac{L_{eq} \varepsilon_2 R_{a2}^+}{R_{eq} + R_{a2}^+ - L_{eq} k_2} \text{sat}(i_q^+ - i_{qref}^+) \end{cases} \quad (20)$$

当电网发生大幅度故障时，仅仅依靠控制策略很难将系统调整至稳定运行状态。文中选用了一种接入保护电路的新型子模块拓扑，如图 3 所示；同时采用了故障穿越控制策略，通过监测正序电网电压来识别系统的故障，并根据 GB/T 12325—2008《电能质量供电电压偏差》设置：当高压直流母线电压波动超过 10%时，认为电网处于故障状态。在故障条件下优先考虑无功电流的输入，首先切断对 MMC 直流母线的控制，即 S_1 由 1 档切换至 2 档，同时由于 PET 可以通过减小输出有功功率，实现无功功率补偿功能，因此在发生故障时将 d 、 q 轴电流参考值根据故障情况直接给出。文中考虑的情况为风机满功率运行，根据文中设置的工况和故障穿越时的无功电流要求可知，故障时 q 轴电流参考值 i_{qg}^* 和 d 轴电流参考值 i_{gd}^* 分别为：

$$i_{qg}^* = \begin{cases} 1 & 0 \leq \Delta v_g \leq 0.5 \\ 2 \frac{v_{gref} - v_g}{v_g} & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

$$i_{gd}^* = \sqrt{i_{gmax}^2 - i_{qg}^2} \quad (22)$$

式中： Δv_g 为网侧电压变化值； v_{gref} 、 v_g 分别为网侧电压参考值和实际值； i_{gmax} 、 i_{qg} 分别为网侧电流最大值和 q 轴电流实际值。

因此在故障发生时将故障开关 S_2 设置为 2 挡，以此向系统输入无功功率来帮助系统渡过故障。在优先输入无功电流之后，系统剩余的能量通过切换 S_2 继续输入剩余的有功功率。

电网发生短路故障时，网侧电压迅速跌落，而风机输出功率不变，从而导致电流迅速上升，过剩的有功功率会积累在高压直流电容中，导致电容电压升高，即 MMC 子模块电容电压升高。为避免损坏电力电子器件，在发生故障时闭合 S_3 使 MMC 半桥子模块与直流斩波器并联，并通过磁保持继电器

产生斩波电路的开关信号。

根据电网低电压穿越的要求，以三相短路故障为例，可以计算在电网故障时子模块电容电压承受的两侧能量差值 E_{LVRT} 为：

$$E_{LVRT} = \int_0^t \Delta P d\tau \quad (23)$$

式中： ΔP 为电压跌落时并网功率与额定功率的差值。

而保护电容的理想储能容量 E_c 为：

$$E_c = C_c U_c^2 / 2 \quad (24)$$

式中： U_c 为电压参考值。由此可计算出电容的取值范围。

风力发电机产生的电能可以通过中间级传输至直流斩波器，在电网故障时通过开通/关断斩波保护电路，将经过子模块的电压维持在一个恒定的范围内。MMC 的具体控制框图如图 4 所示。其中， v_{hdref} 为高压直流母线电压参考值； Q_{sref} 、 Q_s 分别为系统无功功率参考值和实际值； i_d 、 i_q 分别为网侧电流的 d 、 q 轴分量。

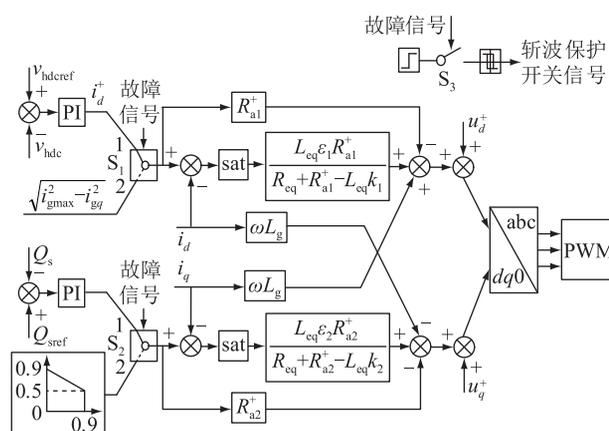


图 4 基于故障穿越控制策略的 MMC 内环控制框图

Fig.4 MMC inner-loop control block diagram based on fault crossing control strategy

2.2 DAB 的控制策略

由于 MMC-PET 输入级只对输出直流电压进行了稳压控制而未考虑各 DAB 变换器输入电压平衡控制，所以需要采取输入均压控制策略以平衡各子模块传输功率。中间隔离级 DAB 的控制结构框图如图 5 所示。

图 5 中， u_{dref} 、 u_{dc} 分别为直流侧输出电压的参考值和实际值； u_{inN} ($N=1,2,3$) 为串联侧子模块的输入电压； $u_{in(avg)}$ 为子模块输入电压的平均值； θ^* 、 $\Delta\theta_N$ 分别为各子模块移相角的参考值、修正值； θ_N 为参考值与修正值之差。控制器最终输出各子模块实际移相比，生成最终的参考信号。此控制策略的控制较为简单且稳定性较好，能达到较好的均压

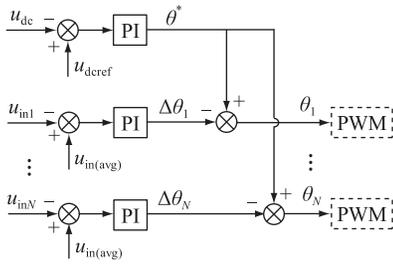


图5 隔离级输入均压控制框图

Fig.5 Isolation stage input pressure equalization control block diagram

效果^[26]。

2.3 RSC 的控制策略

DFIG 的 RSC 通过使发电机工作在超同步或次同步模式来确保 DFIG 的变速运行。在超同步模式下,发电机产生的总功率部分由 RSC 输出;在次同步模式下,RSC 将有功功率注入转子。理想中的 RSC 使用解耦的 d 、 q 同步参考系进行控制,将参考系的 q 轴与电机定子电压对齐。这样做可以通过控制 q 轴转子电流 i_{qr} 直接控制机器产生的扭矩。此外,也可以通过控制定子端产生的无功功率来控制 d 轴转子电流 i_{dr} 。

RSC 控制框图如图 6 所示,其控制原理为选择合适的最大功率点跟踪曲线跟踪最佳转子速度 ω_r^* ,并与实际转速 ω_r 进行比较。PI 控制器通过产生机器的参考电磁转矩 T_e^* 来减小误差,并根据式 (25) 的转矩方程,计算 q 轴参考转子电流 i_{qr}^* 。该电流与实际 q 轴转子电流 i_{qr} 进行比较,误差由 PI 控制器处理以生成 q 轴转子参考电压 v_{qr}^* ,同时通过锁相环(phase locked loop, PLL)使输出信号完全追踪输入信号。图 6 中, R_r 为转子侧电阻; L_m 、 L_s 分别为转子与定子的互感以及转子电感。

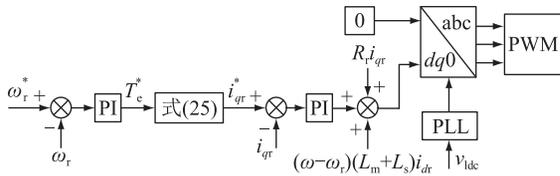


图6 RSC 控制框图

Fig.6 RSC control block diagram

$$i_{qr}^* = -T_e^* L_s / (\lambda L_m) \quad (25)$$

式中: λ 为定子电流与电感 d 、 q 轴分量的乘积等效值。

在此控制策略中,定子端通过 PET 与电网完全解耦。MMC 提供来自电网的任何无功功率需求,而机器仅产生有功功率,从而无须对 d 轴转子电流和电压进行控制。因此,RSC 的 d 轴转子参考电压 v_{dr}^*

保持为零^[27]。

2.4 MSC 的控制策略

MSC 需要满足的功能有:维持定子端所需的电压,将有功功率从定子端传输到低压直流母线处。低压直流母线则由 DAB 变换器的高频变压器调节,因此 MSC 将在定子端充当刚性网络的作用。在并网模式下,网侧换流器需要在不同工况下提供电压和频率支撑,所以应具备抗干扰性强、输出电能质量高等特性。因此文中采用输出电压和滤波电感电流反馈相结合的双环控制。外环采用恒定电压的控制方式,在电网故障下可以稳定输出直流电压和给定无功功率值,同时为内环提供电流参考值。此控制策略可进一步减小由电网故障造成的无功功率波动给电网运行带来的影响^[28]。恒定电压和无功功率的控制采用基本的 PI 控制方式。内环采用基于 PI 控制的电流解耦控制。MSC 控制框图如图 7 所示。图 7 中, v_{dcref} 为低压直流母线电压参考值; i_{md} 、 i_{mq} 分别为输出的三相电压 d 、 q 轴的实际值; i_{mdref} 、 i_{mqref} 分别为输出的三相电压 d 、 q 轴的有效值; Q_{mref} 、 Q_m 分别为无功功率的参考值、实际值; e_{md} 、 e_{mq} 分别为桥臂中点电压 d 、 q 轴的分量,通过反变换将其变成调制波信号。

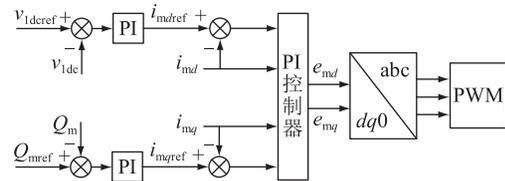


图7 MSC 控制框图

Fig.7 MSC control block diagram

3 软件仿真与硬件实验分析

3.1 仿真参数模型

为验证所提系统的有效性,进行 4 种不同工况的仿真模拟实验。文中在 MATLAB/Simulink 仿真实验平台上搭建了基于 MMC-PET 接口的风力发电系统模型,并进行仿真对比。系统仿真实验参数见表 1,控制器仿真参数见表 2。

3.2 仿真结果分析

文中首先进行了电网发生不平衡波动时的仿真实验,并根据 GB/T 36995—2018《风力发电机组故障电压穿越能力测试规程》,选择电网电压不平衡暂降、单相电压跌落故障、三相接地短路故障、低电压穿越 4 种典型故障工况作为验证算例。通过对上述 4 种不同工况的仿真来分析所提新型结构的故障穿越性能。

表 1 系统仿真参数

| Table 1 System simulation parameters | | |
|--------------------------------------|---------------------------|-----------|
| 参数 | 数值 | |
| 系统 | 额定功率/(MV·A) | 5 |
| | 电网频率/Hz | 50 |
| | 电网额定电压/kV | 35 |
| 风力发电机 | 额定风速/(m·s ⁻¹) | 15 |
| | 额定功率/(MV·A) | 1.66 |
| | 风机数量 | 3 |
| | 额定电压/V | 690 |
| MMC-PET | 定转子匝数比 | 225:2 025 |
| | 低压直流母线电压 v_{ldc} /kV | 1.25 |
| | 低压侧电容/mF | 4 |
| | 高压直流母线电压 v_{hdc} /kV | 67.5 |
| | 高压侧电容/mF | 5 |
| | 高频变压器频率/Hz | 2 000 |
| | 变压器匝数比 | 675:11 |
| | 单个桥臂子模块数 | 25 |
| | 子模块电容 C_{sm} /mF | 5 |
| | 子模块电压参考值/kV | 2.7 |
| 桥臂电阻 R_b /mΩ | 25 | |
| | 桥臂电感 L_b /mH | 2.5 |

表 2 控制器仿真参数

Table 2 Simulation parameters of controller

| 控制器 | 参数 | 数值 |
|---------|--------------------------------|--------------|
| MMC(内环) | R_{a1}^+, R_{a1}^- | 100, 100 |
| | R_{a2}^+, R_{a2}^- | 100, 100 |
| | $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ | 0.8, 0.8 |
| | k_1, k_2 | 2 100, 2 100 |
| RSC | 比例系数 | 45 |
| | 积分系数 | 100 |
| DAB | 比例系数 | 10 |
| | 积分系数 | 2 |
| MSC(内环) | 比例系数 | 80 |
| | 积分系数 | 150 |

注: R_{a1}^-, R_{a2}^- 为控制器负序注入的阻尼。

3.2.1 工况 1: 电网电压不平衡暂降

由于电网运行时电力负载的变化、电力电子元器件故障等因素,电网电压极易出现不平衡,因此文中将电网电压不平衡作为典型工况,此时仿真实验结果如图 8 所示。

图 8(a)为电网发生不平衡时的网侧电压,设置在 2 s 时电网电压发生三相不平衡波动(即 a 相 0.7 p.u., b、c 相 0.8 p.u.),持续时间为 150 ms。传统的 MMC-PET 通常采用 PI 控制,而在面对非线性或变化较快的工作条件时,可能会出现静态误差、控制效果不好等一系列问题,同时由于系统具有复杂的非线性特性,PI 控制器的参数整定将变得十分

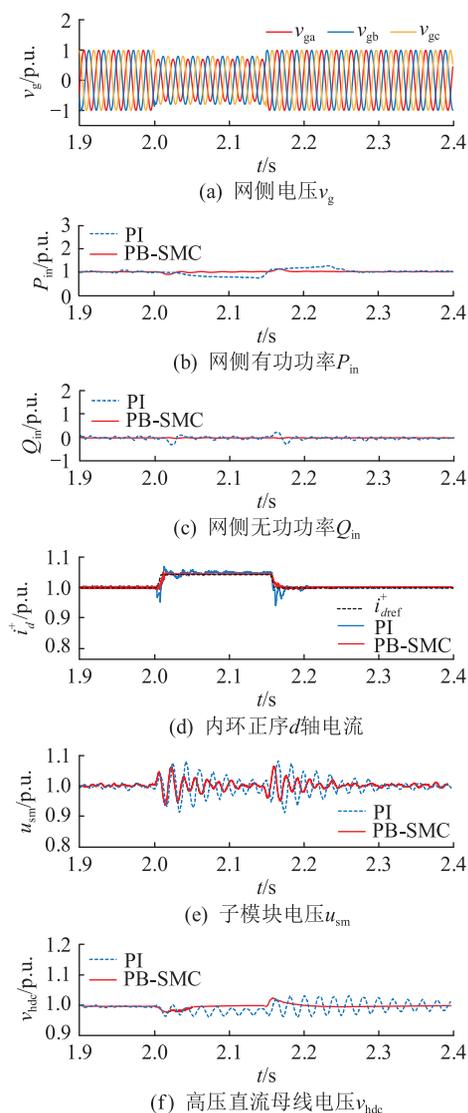


图 8 电网电压不平衡下的仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms under power grid voltage imbalance

复杂。图 8(b)、(c)分别为电网发生不平衡时采用 PI 控制、PB-SMC 控制策略的网侧有功、无功波形,可以看出使用文中控制策略的波动更小,稳定性更强。图 8(d)一(f)分别为不同控制策略下的正序 d 轴电流、子模块电压、高压直流母线电压波形。电网发生不平衡波动会引起 MMC 内部参数的变化。由于传统 PI 控制策略对局部线性化的小信号模型的依赖度较高,当桥臂电阻、电感值发生大幅度振荡时,传统 PI 控制会出现失稳现象,即正、负序电流出现大幅度波动,不能较好地保持系统的稳定运行。而文中采用的控制策略相较于 PI 控制具有无超调、响应速度更快且更稳定的优点,在 MMC 电阻、电感发生变化时,依然可以迅速地跟随期望值。无源滑模控制器具有全局渐近稳定性,对于 MMC 参数扰动表现出很好的鲁棒性。

3.2.2 工况 2: 电网电压单相电压跌落故障

在电网电压三相不对称故障下进行仿真实验, 仿真结果如图 9、图 10 所示。

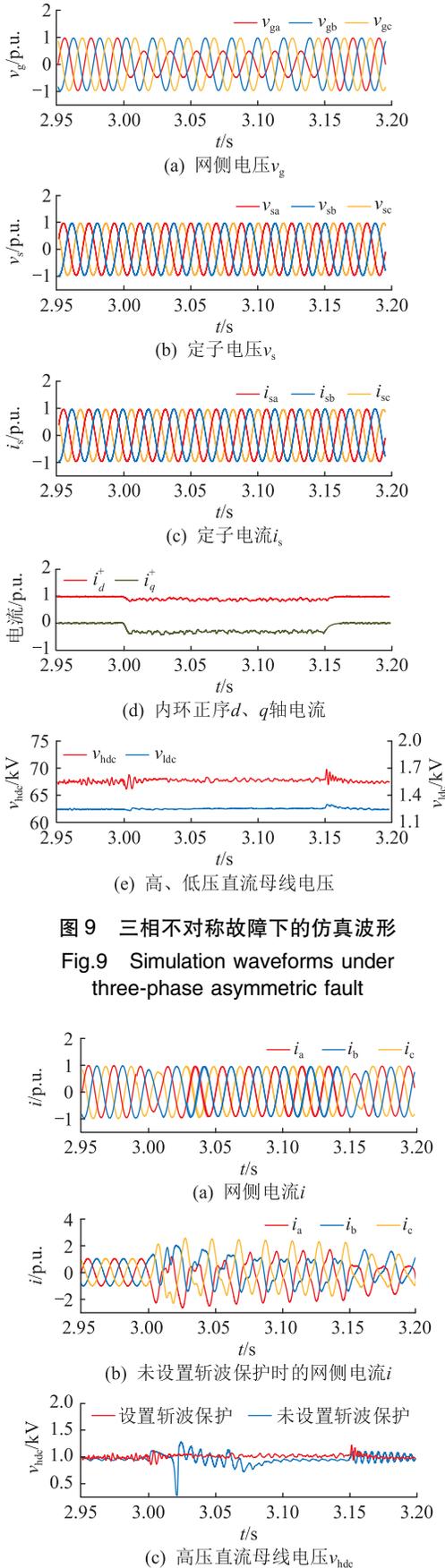


图 9 三相不对称故障下的仿真波形
Fig.9 Simulation waveforms under three-phase asymmetric fault

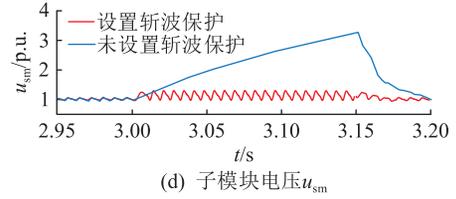


图 10 三相不对称故障仿真对比波形

Fig.10 Three-phase asymmetric fault simulation and comparison waveforms

图 9(a) 为发生故障时的网侧电压, 设置系统在不稳运行至 3 s 时发生三相不对称单相电压跌落故障 (即 a 相 0.5 p.u.), 持续时间为 150 ms。图 9(b)、(c) 分别为机器的定子电压、电流。在故障发生时经过输入级和中间级的控制, MSC 可以输出几乎不受干扰的定子电压、电流, 因此风力发电机依旧保持恒定的运行条件。图 9(d) 为网侧正序 d 、 q 轴电流。根据故障时的设置, d 轴电流参考值 i_{gd}^* 由式 (22) 计算降至 0.8 p.u., 并由式 (21) 计算无功电流参考值 i_{gq}^* 为 0.4 p.u。图 9(e) 为高压直流母线和低压直流母线电压, 在单相故障时仍然向电网传输有功功率, 同时也可以保持稳定。

图 10(a)、(b) 分别为输入级 MMC 设置斩波保护和未设置斩波保护时的注入电网电流波形, 可见在设置斩波保护后虽然发生了不对称变化, 但由于系统的保护模块, 电流仅发生了较小的不对称变化, 相较于未设置斩波保护的系统, 电流畸变大大降低, 且可以更快地恢复稳定。图 10(c) 为高压直流母线电压仿真波形对比, 可见, 未设置斩波保护时电压产生了大幅度波动。在接入保护电路的系统中, 由于斩波电容具有吸能的作用, 有效限制了高压直流母线电压的波动, 保护电力电子元器件免受电压、过电流的损坏。图 10(d) 为半桥子模块电压波形, 暂降时传输功率的不平衡成分通过使用直流斩波器可以防止直流链路电压升高, 保护电力电子开关免受电压的影响, 将子模块电压维持在稳定范围内。

3.2.3 工况 3: 三相接地短路故障

为满足近期电网规范中的故障穿越要求, 文中测试了系统所需要配置的性能, 将网侧出现严重的三相接地故障作为典型工况进行仿真验证, 仿真结果如图 11、图 12 所示。

图 11(a) 为发生故障时的网侧电压, 设置系统在不稳运行至 4 s 时发生严重的三相接地短路故障 (即网侧电压为 0 p.u.), 持续时间为 150 ms, 满足电网规范要求的时间。图 11(b)、(c) 分别为机器的定子电压、电流, 由于 MSC 的稳定作用, 在发生三相

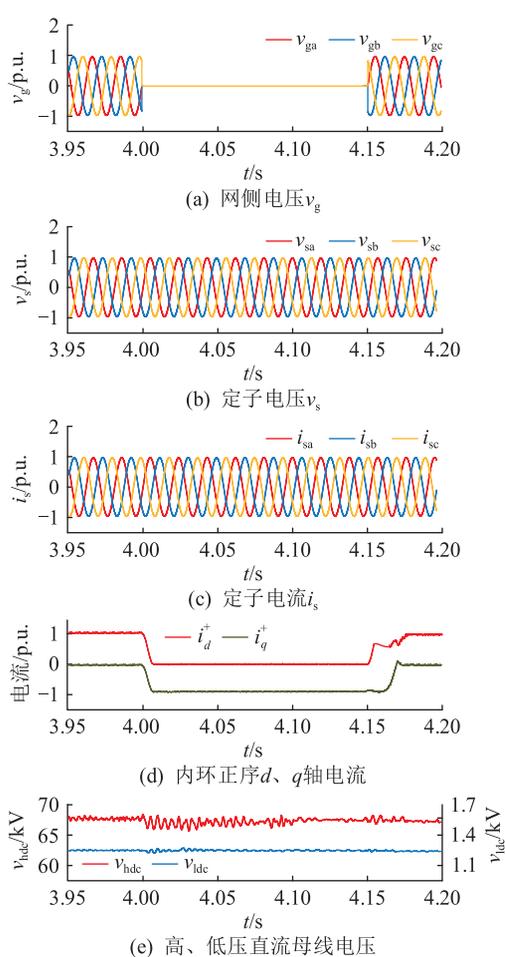


图 11 三相接地短路故障下的仿真波形

Fig.11 Simulation waveforms under three-phase ground short-circuit fault

接地短路故障时系统几乎没有受到故障的影响,风力发电机依旧保持恒定的运行条件。图 11(d)为网侧正序 d, q 轴电流,在发生故障前,风力发电系统以额定功率运行,而当发生故障时,经过故障开关 S_1, S_2 的切换,无功电流参考值 i_{gq}^* 根据式 (21) 计算为 0.9 p.u., d 轴电流参考值 i_{gd}^* 根据式 (22) 计算为 0 p.u.。图 11(e)为高压直流母线和低压直流母线电压,其在发生故障时均可以基本保持稳定。

图 12(a)、(b)分别为输入级 MMC 设置斩波保护和未设置斩波保护的注入电网电流波形,由于保护电路中并联了容量约为 3 倍电网故障能量的超级电容,整个系统可以在电网发生故障时迅速吸收故障能量,维持系统的稳定。图 12(c)为高压直流母线电压仿真波形对比,设置斩波保护后,有效限制了高压直流母线电压的波动。图 12(d)为半桥子模块电压波形,在未设置保护电路的系统中,子模块电压上升至标幺值的 5 倍,极易造成电力电子器件的损坏,而保护电路的介入可以大大抑制子模块电压的升高。三相接地故障相较于单相骤降需要

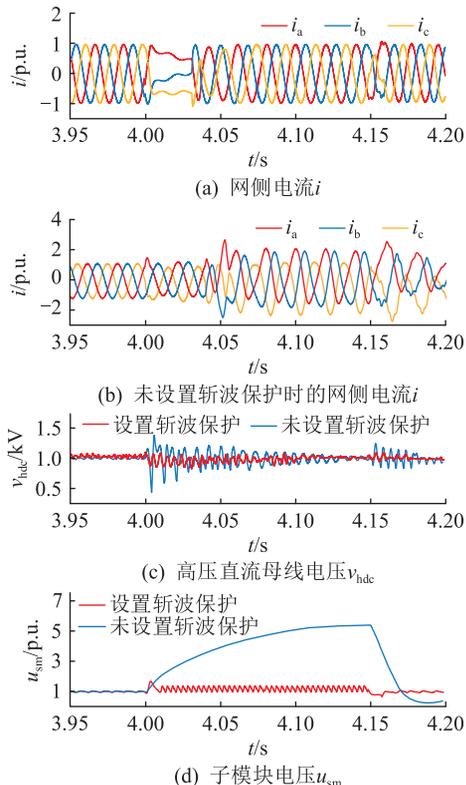


图 12 三相接地短路故障仿真对比波形

Fig.12 Three-phase ground short-circuit fault simulation and comparison waveforms

直流斩波器疏散更多的功率,因此需要更高的开关频率。

为更直观地表现系统在故障发生时的故障穿越能力和系统在故障结束后的恢复速度,表 3 和表 4 分别给出了采用不同配置的高压直流母线电压动态性能对比。可见,在电网电压不平衡暂降、单相电压跌落故障、三相接地短路故障工况下,采用文中结构的新型风力发电系统相较于常规采用 PET 接口的风力发电系统,具有电压波动更小和调整时间更短的优势。同时,设置斩波保护模块可以有效限制高压直流母线电压的波动,在发生故障时系统具有更好的鲁棒性。文中所提结构无论在故障发生时和故障结束后都具有更优秀的动态响应。

表 3 故障发生时的动态响应对比

Table 3 Dynamic response comparison during fault occurrence

| 工况 | 常规系统 | | 文中系统 | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | 电压波动/kV | 调整时间/ms | 电压波动/kV | 调整时间/ms |
| 电网电压不平衡暂降 | 2.7 | 25 | 2.2 | 5 |
| 单相电压跌落故障 | 41.0 | 75 | 6.5 | 11 |
| 三相接地短路故障 | 34.0 | 69 | 6.5 | 12 |

表4 故障结束后的动态响应对比

Table 4 Comparison of dynamic response after a fault is rectified

| 工况 | 常规系统 | | 文中系统 | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | 电压波动/kV | 调整时间/ms | 电压波动/kV | 调整时间/ms |
| 电网电压不平衡暂降 | 3.7 | 32 | 2.4 | 3 |
| 单相电压跌落故障 | 7.2 | 31 | 7.2 | 13 |
| 三相接地短路故障 | 8.9 | 37 | 6.0 | 16 |

3.2.4 工况4:低电压穿越性能对比

为说明文中所提新型系统的性能优势,下面将未设置任何故障穿越技术的DFIG、设置了撬棒保护电路的DFIG 2种系统与文中新型结构的DFIG系统进行对比,仿真比较结果如图13—图15所示。其中,子图(a)为发生故障时的网侧电压,设置在5.1 s时电网电压发生三相骤降故障(即网侧电压为0.2 p.u.),持续时间为625 ms,满足规定的低电压穿越要求;子图(b)为输入级MMC注入电网的电流;子图(c)、(d)分别为机器的定子电压、电流;子图(e)为机器的转子电流;子图(f)为直流母线电压,文中配置中即为低压直流母线电压。

图13为未设置任何故障穿越技术的DFIG风力发电系统。在没有故障穿越技术的辅助下,网侧电压骤降会引起电网和转子电流的激增,最高可增加至标幺值的3~5倍。由于来自转子的功率未注入电网,DFIG背靠背换流器之间的直流链路电压增加到标幺值的近2倍,高压可能会损坏转子侧换流器的开关,而电网和转子侧的高电流可能会损坏机器。

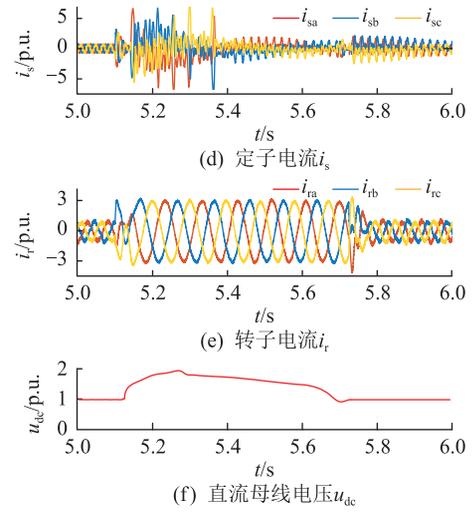
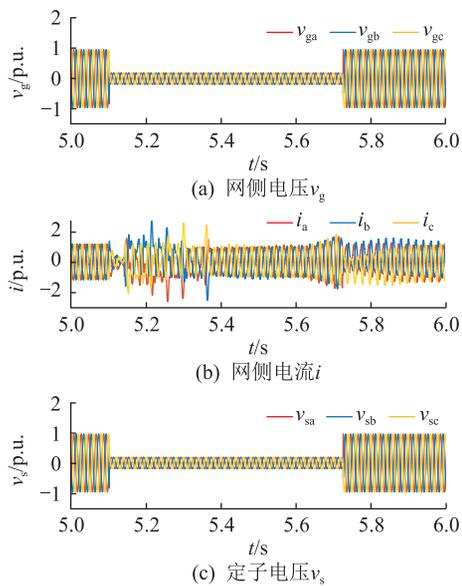


图13 常规的DFIG系统

Fig.13 Conventional DFIG system

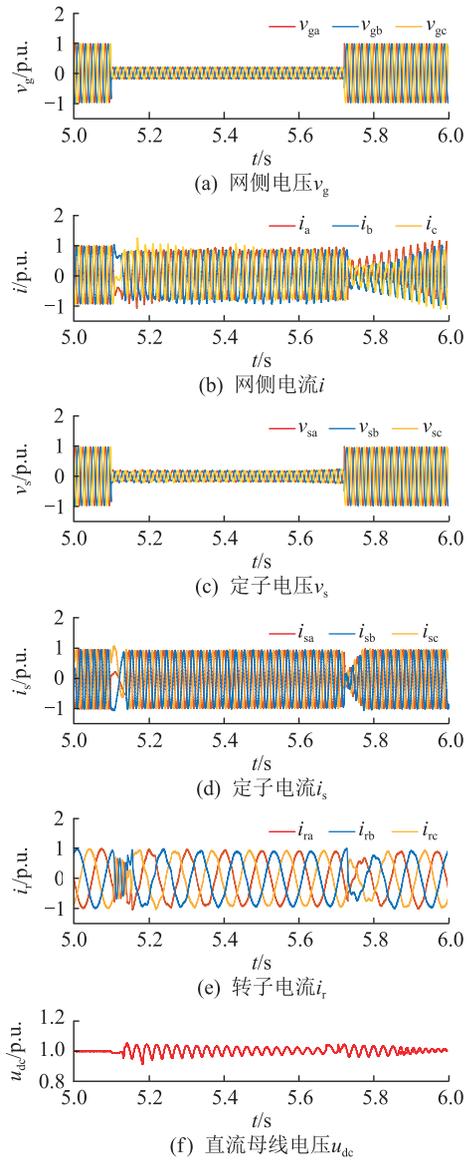


图14 设置撬棒保护电路的DFIG系统

Fig.14 DFIG system with crowbar protection circuit

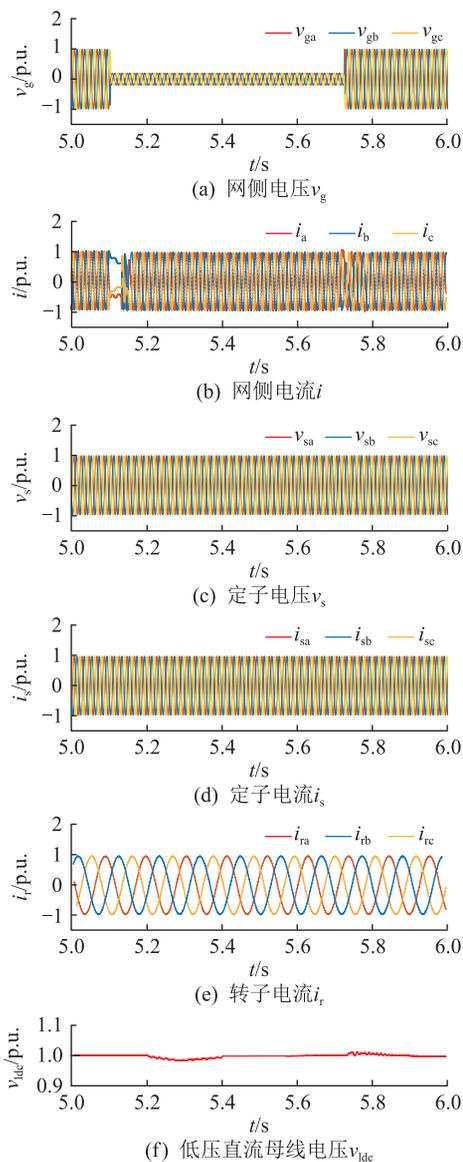


图 15 文中新型结构的 DFIG 系统

Fig.15 DFIG system with a new structure in this paper

图 14 为设置了撬棒保护电路的 DFIG 风力发电系统。在双馈风力发电机组的商用领域中,连接转子侧的撬棒式保护电路应用最为广泛。在发生故障时,连接的电阻消耗了大部分由故障产生的能量,使得直流母线电压不再迅速上升,但依然存在明显波动。

图 15 为基于文中新型结构的 DFIG 风力发电系统,相较于其他 2 种结构配置,其直流母线电压基本保持恒定,同时电网和转子侧电流不受故障影响,机器可以近乎无缝地进行故障穿越。此外,所提结构配置具有在故障期间注入无功电流的能力,前文已详细说明,体现了文中配置的优势。

3.3 硬件实验分析

文中通过 RT-LAB 半物理实验平台对所提出的新型风电并网系统结构进行了实验验证。利用 RT-

LAB 实验平台建立控制系统,包括但不限于交流电网、输入侧 MMC 整流器、中间隔离级 DAB、RSC、MSC 等,并采用 dSPACE 控制器进行调制,如图 16 所示。dSPACE 控制器中含有 DS1103ADC,用于读取各控制器电压、电网电压和电网电流。DS1103DAC 用于测量参数,DS1103SLDSP 用于生成 PWM 信号以实现调制。DS1103 是一种适用于逆变器控制的控制器板,可实现硬件与软件仿真环境之间的连接,实现算法、编译算法并转换成 C 语言代码,然后加载到实时 dSPACE 处理器上。RT-LAB 驱动系统将系统模型加载到配置有研究所需的 I/O 接口的实时仿真平台上。

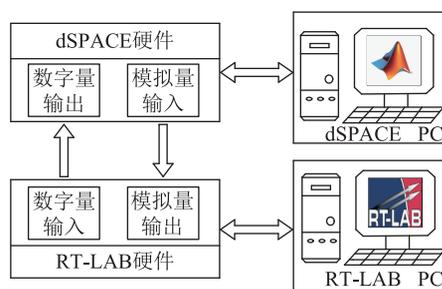
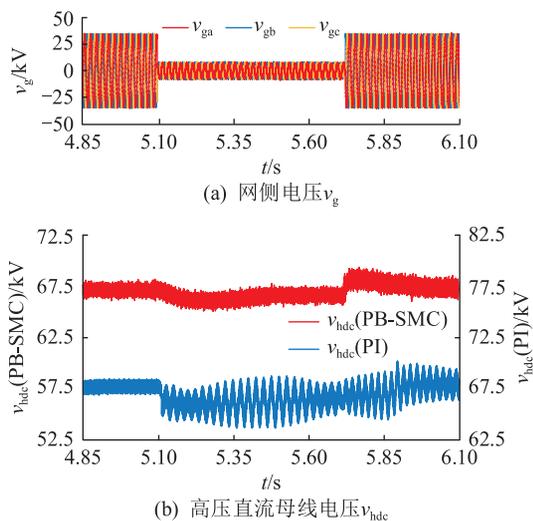


图 16 基于 RT-LAB 的半物理实验平台示意

Fig.16 Schematic diagram of semi-physical experiment platform based on RT-LAB

考虑到如今电网故障的穿越要求,选择工况 4 进行实验,图 17 为实验中高压侧采用传统 PI 控制与文中控制策略的控制效果对比。相较于传统的 PI 控制策略,文中采用的 PB-SMC 控制策略具有波动更小、响应速度更快等特点,系统具有更好的鲁棒性。

图 18(a)、(b) 分别为文中提出的新型系统结构在电网发生故障时的定子电流、转子电流。由图可知,文中结构在进行故障穿越时可以保持恒定的定子、转子电流,相较于传统结构具有明显优势。因此,半硬件实验与软件仿真结论一致。



(a) 网侧电压 v_g

(b) 高压直流母线电压 v_{dc}

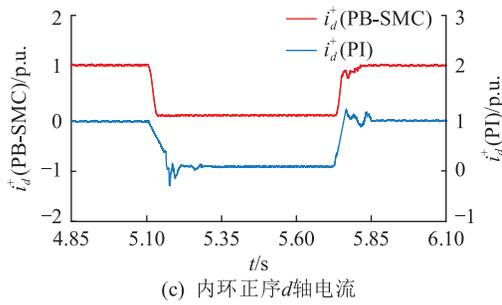


图 17 低电压穿越时高压侧 2 种控制策略的控制效果对比

Fig.17 Control effect comparison of two control strategies on high voltage side during low voltage ride through

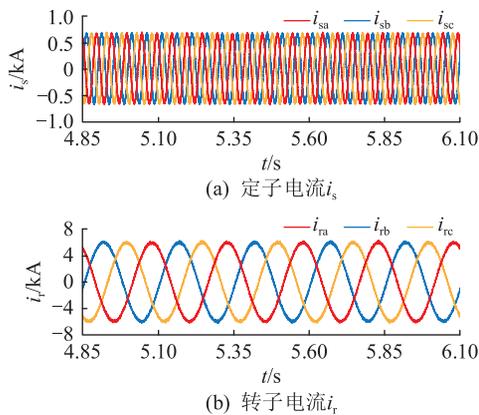


图 18 低电压穿越时 DFIG 的定、转子电流波形
Fig.18 Current waveforms of DFIG stator and rotor during low voltage ride through

综上,通过 MATLAB/Simulink 仿真和 RT-LAB 实验平台的基于 MMC-PET 接口风力发电系统的半物理实验可以验证文中所提新型系统结构的可行性。使用该结构的系统可以进行无缝故障穿越,满足电网运行要求。

4 结论

文中提出并设计了基于无源滑模变结构控制的 MMC-PET 作为 DFIG 系统与电网之间的接口,通过理论分析与实验验证表明新型系统结构及其控制策略的优点如下:

(1) 在故障运行时相较于采用传统 PI 控制策略的电力电子变压器,新型系统结构及其控制策略提升了系统的稳定性,增强了系统的故障穿越能力,且满足电网最新要求,可以在平衡和不平衡故障发生期间进行无缝穿越。

(2) 新型系统结构替换了常规 DFIG 系统的网侧换流器,使得系统整体体积更小、结构更简单,在简化 DFIG 控制策略的同时可以保持直流母线电压

的稳定;风力发电系统直接由 MMC-PET 接口进行功率传输,使得系统具有更好的有功功率传输和在故障条件下更好的无功功率补偿能力。

致谢

本文得到上海市电站自动化技术重点实验室项目(13Z2273800)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] GWEC. Global wind report 2022[R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2022.
- [2] 王振浩,李金伦,王欣铎,等. 风电接入真双极 MMC-MTDC 系统直流故障穿越协调控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 26-36.
WANG Zhenhao, LI Jinlun, WANG Xinduo, et al. DC fault ride-through coordinated control strategies for bipolar MMC-MTDC system with wind power connected[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 26-36.
- [3] 谈竹奎,文贤馥,杨涛,等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 181-187.
TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, et al. A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 181-187.
- [4] 郑晗. 降低高电压风险的双馈风电机组低电压穿越参考功率整定[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(4): 161-168.
ZHENG Han. Low voltage ride-through reference power setting for doubly-fed induction generator to reduce high-voltage risk[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 161-168.
- [5] 张勇,季兰兰,袁艺嘉,等. 柔性直流变压器有载分接开关控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 35-45.
ZHANG Yong, JI Lanlan, YUAN Yijia, et al. On-load tap changer control strategy for VSC-HVDC transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 35-45.
- [6] 张健文,周剑桥,施刚,等. 基于环流注入控制的 MMC 型固态变压器低压直流真双极运行方案[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2350-2363.
ZHANG Jianwen, ZHOU Jianqiao, SHI Gang, et al. Operation and control of MMC-type solid state transformer with bipolar LVDC port based on active circulating current injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2350-2363.
- [7] 王长伟,招永锦,吴晗,等. 考虑新型配电元件多状态可靠性模型的配电网可靠性评估[J]. 供用电, 2023, 40(4): 74-82.
WANG Changwei, ZHAO Yongjin, WU Han, et al. Reliability evaluation of distribution network considering multi-state reliability model of new distribution components[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(4): 74-82.
- [8] KHATUN M F, SHEIKH M RI. Low voltage ride through capability enhancement of DFIG-based wind turbine by a new topology of fault current limiter[C]//2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering

- (ICECTE). Rajshahi, Bangladesh. IEEE, 2016: 1-5.
- [9] 束洪春, 王文韬, 江耀曦, 等. 一种具备直流故障清除能力的新型 MMC 子模块拓扑[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 75-81.
- SHU Hongchun, WANG Wentao, JIANG Yaoxi, et al. Novel MMC sub-module topology with DC fault clearing capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 75-81.
- [10] 江守其, 张林, 李国庆, 等. 基于改进型 MMC 的风电直流联网系统直流故障穿越协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 27-35.
- JIANG Shouqi, ZHANG Lin, LI Guoqing, et al. DC fault ride-through control strategy of wind power integrated DC transmission system based on modified MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 27-35.
- [11] BU S Q, DU W J, WANG H F, et al. Power angle control of grid-connected doubly fed induction generator wind turbines for fault ride-through[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(1): 18-27.
- [12] XU Y F, TANG G F, LI W G, et al. A three-phase integrated power electronic transformer with the capability of DC fault clearance[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(4): 785-796.
- [13] TENG J X, SUN X F, BU Z M, et al. Optimization scheme based on high-frequency link interconnection of submodules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 13645-13659.
- [14] 孙丽玲, 王艳娟. 电网电压不对称骤升时双馈风力发电机定子磁链暂态全过程及控制策略研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2160-2166.
- SUN Liling, WANG Yanjuan. Study on transient whole-process and control strategy of stator flux in doubly-fed induction generator with asymmetric voltage swell[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2160-2166.
- [15] 姜惠兰, 王绍辉, 李希钰, 等. 考虑动态电压区间无功支撑的双馈风机连锁故障穿越控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 147-155.
- JIANG Huilan, WANG Shaohui, LI Xiyu, et al. Cascading fault ride-through control strategy for doubly-fed wind turbines considering reactive power support in dynamic voltage range[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 147-155.
- [16] LI X J, LIU C, WANG M Y, et al. A novel wind energy conversion system with DFIG DC-side connected to SST for medium-voltage DC grid integration[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-2020-ECCE Asia). Nanjing, China. IEEE, 2020: 3186-3191.
- [17] 郑通, 王奎, 郑泽东, 等. 基于 MMC 拓扑的电力电子变压器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5630-5649.
- ZHENG Tong, WANG Kui, ZHENG Zedong, et al. Review of power electronic transformers based on modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5630-5649.
- [18] 蒋谦, 黄志豪, 程启明, 等. 基于 MMC 的 PET 中间隔离级 DC-DC 变换器的新型模型预测控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(4): 49-57.
- JIANG Qian, HUANG Zhihao, CHENG Qiming, et al. Novel model predictive control strategy for MMC-based DC-DC converter in the intermediate isolation stage of PET[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(4): 49-57.
- [19] 陈静, 赵涛, 徐友, 等. 一种量化误差可控的少子模块 MMC 混合调制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 105-113.
- CHEN Jing, ZHAO Tao, XU You, et al. A hybrid modulation strategy for MMC with controllable quantization error[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 105-113.
- [20] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
- LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [21] 王春霖, 赵涛, 徐友, 等. 电网电压不平衡工况下 MMC 的降频模型预测控制[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 67-75.
- WANG Chunlin, ZHAO Tao, XU You, et al. Frequency reduction model predictive control of MMC under unbalanced grid voltage condition[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 67-75.
- [22] 程启明, 李剑辉, 赖宇生, 等. 非理想条件下基于 MMC 的电力电子变压器的无源滑模控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1556-1566.
- CHENG Qiming, LI Jianhui, LAI Yusheng, et al. Passivity-based sliding-mode control strategy for power electronic transformer based on MMC under non-ideal conditions[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1556-1566.
- [23] 鲍克勤, 吴浩强, 程启明, 等. 基于 E-L 模型的电力弹簧无源控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4986-4995.
- BAO Keqin, WU Haoqiang, CHENG Qiming, et al. Passive-based control strategy of electric springs based on E-L model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4986-4995.
- [24] 李生虎, 叶剑桥, 陈东. 基于无源控制的 DFIG 并网次同步控制相互作用抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 77-85.
- LI Shenghu, YE Jianqiao, CHEN Dong. Passive control strategy to mitigate sub-synchronous control interaction of DFIG-based integrated power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 77-85.
- [25] 孙凯, 卢世蕾, 易哲嫒, 等. 面向电力电子变压器应用的大容量高频变压器技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8531-8546.
- SUN Kai, LU Shilei, YI Zheyuan, et al. A review of high-power high-frequency transformer technology for power electronic transformer applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8531-8546.

- [26] SHE X, HUANG A Q, BURGOS R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3):186-198.
- [27] KHAZRAEI M, PRABHALA V A K, AHMADI R, et al. Solid-state transformer stability and control considerations [C]// 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC. Fort Worth, TX, USA. IEEE, 2014:2237-2244.
- [28] PENA R, CLARE J C, ASHER G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation [J]. IEE Proceed-

ings-Electric Power Applications, 1996, 143(3):231.

作者简介:



程启明

程启明(1965),男,博士,教授,研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用等(E-mail:chengqiming@sina.com);

孙英豪(1999),男,硕士在读,研究方向为电力系统自动化、电力电子变压器等;

程尹曼(1990),女,硕士,工程师,从事电力运行与经济管理、新能源发电技术等工作。

Modeling and control of wind power generation system based on MMC-PET interface during grid faults

CHENG Qiming¹, SUN Yinghao¹, CHENG Yinman², ZHANG Lei², QU Bogang¹

(1. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power

(Shanghai Key Laboratory of Power Plant Automation Technology), Shanghai 200090, China;

2. North Power Supply Branch, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200041, China)

Abstract: In recent years, the power electronic transformer (PET) used as the wind energy conversion system at the grid interface has attracted widespread attention for its ability to effectively suppress voltage fluctuations caused by the transient characteristics of wind energy without the need for additional reactive compensation devices. However, the conventional PET structure poses control challenges during grid faults, making it difficult to manage unbalanced grid conditions and compromising system dynamic performance. To enhance dynamic performance and fault tolerance, this paper proposes a novel wind energy conversion system based on the modular multilevel converter (MMC) power electronic transformer, along with its structural design and control strategy. Firstly, a fault-switching control strategy based on passive sliding mode control is designed to handle system operation during faults, incorporating sub-modules with fault protection features to dissipate fault power. Secondly, extensive simulation studies are conducted under various operating conditions using software simulation and semi-physical simulation platforms. Finally, comparative experiments between the proposed wind power generation system and traditional wind power systems validate the advantages of the novel system structure using the proposed control strategy, including reactive power compensation, effective limitation of submodule voltage rise during faults, and improvement in power quality. The results demonstrate the outstanding fault crossing capabilities of the proposed system in meeting the latest requirements for grid operation under fault conditions.

Keywords: modular multilevel converter (MMC); power electronic transformer (PET); wind power grid-connected interface; wind power system; passivity-based sliding-mode control; fault crossing

(编辑 陆海霞)