

电网故障下永磁直驱风电机组机电暂态全过程等值建模方法

杨旼才¹, 余建峰², 欧阳金鑫², 夏翰林¹, 姚 骏²

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 404100;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆大学, 重庆 400044)

摘要: 随着风电渗透率的增加, 大规模风电并网对电网暂态的影响越来越大, 亟需建立可用于大型电力系统暂态稳定分析的永磁直驱风电机组机电暂态模型。目前, 永磁直驱风电机组的建模已有较深入的研究, 但忽略了电网故障下风电机组运行工况的多状态性, 难以通过简化等值的方式准确模拟风电机组在机电暂态过程的外特性, 严重制约了含新能源发电的电力系统机电暂态分析。为此, 文中考虑了变流器控制响应特性以及低电压穿越措施的影响, 分析了电网故障下永磁直驱风电机组的多状态性特征, 提出了永磁直驱风电机组机电暂态全过程建模思想; 然后建立了多种状态下永磁直驱风电机组的机电暂态等值模型, 进而通过推导状态切换条件, 建立了永磁直驱风电机组故障全过程的机电暂态等值模型。最后通过仿真验证等值模型的有效性。

关键词: 永磁直驱风电机组; 机电暂态; 等值建模; 多状态性; 电网故障

DOI: 10.12067/ATEEE2101031

文章编号: 1003-3076(2021)05-0022-12

中图分类号: TM743

1 引言

近年来, 风电装机容量持续增长。其中, 基于永磁同步发电机 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) 的永磁直驱风电机组 (Permanent Magnet Wind Turbine, PMWT) 由于其安全可靠性和运行效率高、无功调节能力强及维护成本低等优点, 在风电场中所占的比重越来越高, 已成为目前的主流机型^[1,2]。但是, 随着风电的大量应用, 电压波动、系统暂态稳定等问题逐渐暴露^[3-5]。特别是全功率背靠背变流器将 PMSG 与电网隔离, 使其二者运行不同步, 由此产生了新的暂态稳定问题。因此, 亟需建立不同工况和不同状态下的 PMWT 模型。

PMWT 的模型包括详细模型和简化等值模型两类。详细模型完整模拟了风力机、传动轴系、永磁同步发电机、全功率变流器及其控制系统的响应特性。但是, 详细模型阶数高、运行速度慢, 将其应用于电力系统的分析十分复杂且低效。为此, 部分文献通过降低阶数来建立 PMWT 的简化模型。文献[6]建立了集中质量块传动系统的机组模型用以模

拟风电机组对电网的频率影响。文献[7]简化了变流器和变压器。文献[8]提出电励磁同步电机等效 PMSG 的风电机组建模方法, 增加了转子特性的影响。文献[9]基于 PMSG 能够快速跟踪给定的功率指令的特点, 将其等值为可控功率源。文献[10]将 PMWT 简化为电压源型逆变器等值模型和受控电压源等值模型。文献[11]对传动系统模型与变流器模型进行了降阶简化, 同时忽略了桨距角控制模型。文献[12]建立了适用于小干扰稳定分析的 PMWT 降阶模型。文献[13]将发电机-变流器模型等值为代数运算的可控电流源。但是, 上述模型均未考虑在电网故障期间 PMWT 状态的多样性及其状态的切换过程。

由于电力系统发生故障时, 风电机组机侧和网侧功率不平衡, 因此机侧多余的功率将对 PMWT 直流电容进行充电, 可能导致直流电容过电压, 因此一般需要通过卸荷来消耗不平衡功率^[14,15]。现有卸荷方法主要是在直流电容侧加卸荷电路 (chopper)。此外, 由于电力系统发生故障时 PMWT 输出电流增大, 会损坏变流器, 所以需要闭锁变流器。目前通常

收稿日期: 2021-01-19

基金项目: 国网重庆市电力公司科技项目 (2020 渝电科技 28#)、国家自然科学基金项目 (51877018)

作者简介: 杨旼才 (1991-), 男, 重庆籍, 工程师, 硕士, 主要研究方向为网源协调;

欧阳金鑫 (1984-), 男, 重庆籍, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统分析、保护与控制等 (通讯作者)。

利用对电力电子器件施加负电压脉冲进行关断,从而实现闭锁。chopper 的投入和变流器的闭锁均会改变 PMWT 的主回路,导致 PMWT 的输出特性发生变化,因此,PMWT 的建模必须考虑卸荷电路(chopper)是否投入以及变流器是否闭锁。但是,针对低电压穿越影响下 PMWT 的全过程建模,目前仍然鲜有研究。某一状态下的单一模型忽略了 PMWT 结构改变带来的输出特性变化,势必产生极大偏差。

文中考虑了变流器控制响应特性以及低电压穿越影响,提出了一种 PMWT 机电故障暂态全过程建模方法。首先建立了 PMWT 的数学模型;随后分析了电网故障下 PMWT 的多状态性;提出了考虑 PMWT 多态性的机电暂态全过程建模思想;并建立了 PMWT 各种状态的机电暂态等值模型,进而通过推导状态切换条件,建立了 PMWT 故障全过程的机电暂态等值模型;最后通过仿真验证等值模型的有效性。

2 永磁直驱风电机组数学模型

永磁直驱风电机组由风力机、PMSG、全功率背靠背变流器及控制系统等组成,其结构如图 1 所示。其中,控制系统主要包括桨距角控制、机侧和网侧变流器控制和低电压穿越控制。在 PMWT 中,风力机将叶片捕获的风能转化为机械能,驱动与其同轴连接的永磁同步发电机旋转,从而转化为电能输出至电网。PMSG 通过具有隔离作用的全功率变流器与电网连接,使发电机的转速摆脱电网频率的约束,实现了变速恒频运行。

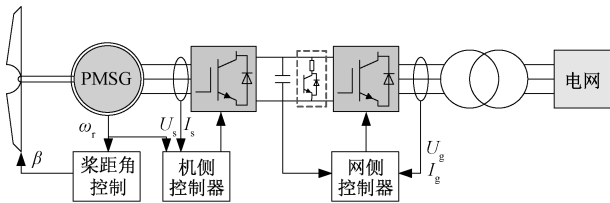


图 1 PMWT 的结构

Fig.1 Structure of PMWT

2.1 风力机模型

风力机叶片捕获的风能和叶片扫过的面积、风能利用系数和风速相关,可表示为:

$$P_m = C_p P_w = 0.5 \rho \pi R_w^2 C_p v_w^3 \quad (1)$$

式中, P_w 为风轮面扫过的功率; C_p 为风能利用系数; ρ 为空气密度; R_w 为风轮半径; v_w 为风速。

2.2 轴系模型

轴系模型的详细模型高达 11 阶^[16],兼顾轴系特性和简化等值的目标,PMWT 的轴系等效为两质量块模型,可表示为:

$$\begin{cases} 2H_w \frac{d\omega_w}{dt} = T_m - K\theta_s - D_s(\omega_w - \omega_m) \\ 2H_e \frac{d\omega_m}{dt} = K_s\theta_s + D_s(\omega_w - \omega_m) - T_e \\ \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_0(\omega_w - \omega_m) \end{cases} \quad (2)$$

式中, H_w 、 H_e 分别为风力机和发电机转子惯性时间常数; ω_w 、 ω_m 分别为风力机和发电机转子机械角速度; θ_s 为风力机相对于发电机转子的角位移; D_s 为风力机和发电机转子轴阻尼系数; K_s 为轴的刚性系数; T_m 、 T_e 分别为风轮输入机械转矩和发电机电磁转矩; ω_0 为电气基准角速度。

2.3 永磁同步机模型

PMSG 采用永磁体励磁,没有阻尼绕组。永磁体安装固定在转子上,为发电机提供恒定的励磁磁场。PMSG 定子绕组采用电动机惯例,其在两相旋转坐标 dq 轴下的数学模型为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - p\omega_m L_q i_{sq} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\omega_m L_d i_{sd} + p\omega_m \psi_f + L_q \frac{di_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中, u_{sd} 、 u_{sq} 分别为定子 d、q 轴电压; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为定子 d、q 轴电流; R_s 为定子绕组电阻; L_d 、 L_q 分别为定子绕组 d、q 轴同步电感; p 为发电机极对数; ψ_f 为发电机中永磁体的磁链幅值。

PMSG 输出的有功功率和无功功率为:

$$\begin{cases} P_s = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \\ Q_s = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

2.4 机侧变流器控制系统

全功率背靠背变流器控制系统是 PMWT 控制系统的核心。机侧变流器一般采用零 d 轴电流控制,使电磁转矩仅与定子 q 轴电流相关,从而实现有功、无功功率的解耦控制。机侧变流器控制系统采用功率外环、电流内环的结构。功率外环控制方程为:

$$\begin{cases} i_{sd_ref} = 0 \\ i_{sq_ref} = (k_{pp} + \frac{k_{ip}}{s})(P_s^* - P_s) \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_s 、 P_s^* 分别为机侧有功功率的实时值和参考值; i_{sd-ref} 、 i_{sq-ref} 分别为机侧 d、q 轴电流的参考值; k_{pp} 、 k_{ip} 为功率外环的 PI 系数。

电流内环的控制方程为:

$$\begin{cases} u_{sd} = (k_{psc} + \frac{k_{isc}}{s})(i_{sd-ref} - i_{sd}) - \omega_e L_q i_{sq} \\ u_{sq} = (k_{psc} + \frac{k_{isc}}{s})(i_{sq-ref} - i_{sq}) + \omega_e L_d i_{sd} + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (6)$$

式中, ω_e 为发电机电角速度; k_{psc} 、 k_{isc} 为电流内环的 PI 系数。

2.5 网侧变流器控制系统

网侧变流器采用电网电压定向矢量控制以实现有功和无功的解耦控制。电网正常运行期间无功功率参考值一般设置为零, 从而保证 PMWT 单位功率因数运行。网侧变流器控制系统一般采用电压外环、电流内环的控制方式。电压外环控制方程为:

$$\begin{cases} i_{gd-ref} = (k_{pu} + \frac{k_{iu}}{s})(U_{dc}^* - U_{dc}) \\ i_{gq-ref} = (k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s})(Q_g^* - Q_g) \end{cases} \quad (7)$$

式中, U_{dc} 、 U_{dc}^* 分别为直流电压的实时值和参考值; Q_g 、 Q_g^* 分别为网侧无功功率的实时值和参考值; i_{gd-ref} 、 i_{gq-ref} 分别为网侧 d、q 轴电流的参考值; k_{pu} 、 k_{iu} 为电压外环的 PI 系数; k_{pq} 、 k_{iq} 为功率外环的 PI 系数。

电流内环的控制方程为:

$$\begin{cases} u_{gd} = (k_{pgc} + \frac{k_{igc}}{s})(i_{gd-ref} - i_{gd}) + e_{gd} + \omega_e L_g i_{gq} \\ u_{gq} = (k_{pgc} + \frac{k_{igc}}{s})(i_{gq-ref} - i_{gq}) + e_{gq} - \omega_e L_g i_{gd} \end{cases} \quad (8)$$

式中, u_{gd} 、 u_{gq} 分别为网侧变流器端 d、q 轴电压; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为网侧 d、q 轴电流; e_{gd} 、 e_{gq} 分别为网侧 d、q 轴电压; L_g 为网侧进线滤波电感; k_{pgc} 、 k_{igc} 为电流内环的 PI 系数。

2.6 桨距角控制模型

桨距角控制是根据风速的大小调整桨矩角, 保证风力机稳定运行在额定转速和转矩下, 确保输出功率稳定。桨距角控制模型采用转速控制的 PI 调节器:

$$\beta = (k_{p\omega} + \frac{k_{i\omega}}{s})(\omega_{e-ref} - \omega_e) \quad (9)$$

式中, β 为桨距角; ω_e 、 ω_{e-ref} 分别为发电机转速的实

时值和参考值; $k_{p\omega}$ 、 $k_{i\omega}$ 为 PI 系数。

3 全过程机电暂态建模思想

3.1 PMWT 的故障多态性

为了避免机网侧功率不平衡导致直流电压的突变, PMWT 会根据故障程度投切卸荷电路以维持直流电压稳定。卸荷电路的投切常采用滞环比较逻辑^[17], 如图 2(a) 所示, 当直流电压 $u_{dc} > u_{dcmax}$ 时, 投入卸荷电路; 当直流电压 $u_{dc} < u_{dcmin}$ 时, 退出卸荷电路。

为了避免机端电压跌落导致网侧过流损坏变流器, 故障严重时触发网侧变流器闭锁动作。变流器闭锁判据采用网侧输出电流 I_g 电流值^[18], 如图 2(b) 所示, 当 I_g 大于变流器电流限幅值 I_{max} 时, 变流器闭锁, 反之变流器正常运行。

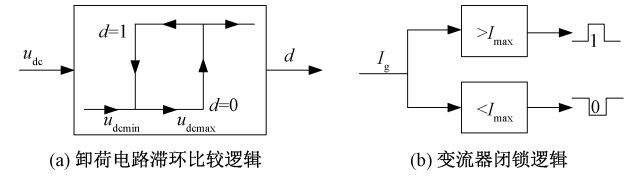


图2 卸荷电路投切与变流器闭锁逻辑

Fig.2 Unloading circuit switching and converter blocking logic

当电压跌落程度较小时, 此时直流侧电压未超过保护阈值, chopper 不投入, PMWT 运行于未投 chopper 状态。当电压跌落程度较大时, chopper 投入以消耗机网侧不平衡功率, 限制直流侧电压增大, 此时 PMWT 运行于带 chopper 状态。PMWT 还存在网侧变流器闭锁以及未闭锁 2 种运行状态。由于故障程度的不同导致电压跌落程度不同, 而且 chopper 是否投入与网侧变流器是否闭锁都与电压相关, 所以, PMWT 存在 5 种运行状态: 正常状态、未投 chopper 状态、带 chopper 状态、网侧变流器未闭锁状态和网侧变流器闭锁状态。

PMWT 的多状态特性如图 3 所示, 运行于正常状态(模式 0)的 PMWT 遭遇电网故障, 导致机端电压跌落。此时 chopper 投切判据启动, 当电压跌落程度较小时, 风电机组运行于未投 chopper 状态, 同时判断网侧变流器是否闭锁, 当网侧变流器未闭锁时, PMWT 运行于未投 chopper 状态下网侧变流器未闭锁状态(模式 1), 当网侧变流器闭锁时, PMWT 运行于未投 chopper 状态下网侧变流器闭锁状态(模式 2)。当电压跌落程度较大时, 风电机组运行于带 chopper 状态, 当网侧变流器处于未闭锁状态

时,PMWT 运行于带 chopper 状态下网侧变流器未闭锁状态(模式3),当网侧变流器处于闭锁状态时,PMWT 运行于带 chopper 状态下网侧变流器闭锁状态(模式4)。

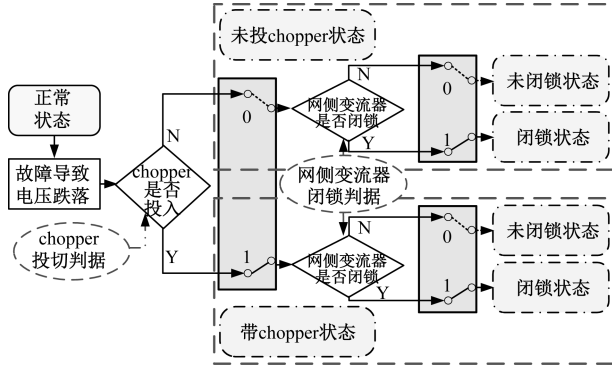


图3 PMWT 的多状态特性

Fig.3 Multi-state characteristics of PMWT

PMWT 风电机组呈现出故障多态性的特点,并且在电网故障下存在 5 种模式的切换。chopper 的投切判据常采用直流电压,网侧变流器闭锁判据常采用网侧变流器电流,为实现各模式下等值模型的切换,需采用统一的判据,由于等值模型中不存在直流电压,因此采用 PMWT 机端电压作为 chopper 投切和网侧变流器闭锁判据。

3.2 PMWT 的等值建模原理

在电力系统暂态特性分析时,风电机组详细模型计算复杂,无法满足系统的计算步长要求,而且系统故障期间主要关注风电机组的外特性^[19],因此需要对 PMWT 进行相应的简化。文中比较 PMWT 各状态量的时间常数与电力系统机电暂态分析的时间尺度的关系,进而对 PMWT 进行简化等值建模。

根据时间常数的定义,感性元件时间常数为 $\tau = L/R$, 容性元件时间常数为 $\tau = RC$ 。根据 PMWT 小信号模型计算状态矩阵的特征值,并定义特征值的倒数为该变量的时间常数^[20],可得到机侧和网侧变流器电流的时间常数。PMWT 主要时间常数如表 1 所示,PMWT 参数见表 2 和表 3。

表 1 PMWT 主要时间常数

Tab.1 Main time constant of PMWT

状态量	时间常数/s
同步机定子磁链	0.11
网侧滤波器电流	0.31
直流电压	0.016
机侧变流器电流	0.02
网侧变流器电流	0.014

表 2 PMWT 主要参数(2 MW)

Tab.2 Main paramoter of PMWT(2 MW)

参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.012
同步电感 d 轴分量/mH	1.28
同步电感 q 轴分量/mH	1.28
网侧滤波器电阻/m Ω	0.36
网侧滤波器电感/mH	0.11
直流侧电容/mF	20
卸荷电阻/ Ω	0.8

表 3 控制器参数

Tab.3 Parameter of Controller

参数名称	参数值
机侧变流器功率环	$k_p = 0.5, k_i = 50$
机侧变流器电流环	$k_p = 0.5, k_i = 10$
网侧变流器电压环	$k_p = 2.76, k_i = 69$
网侧变流器电流环	$k_p = 0.5, k_i = 10$

含 PMWT 的电力系统机电暂态稳定的时间尺度为 100 ms 级,对时间常数小于机电时间尺度的变量(一般小于 1/4 以上),认为在机电暂态分析时已由动态进入稳态,其微分方程由代数方程表示。对于时间常数远大于机电时间尺度的变量态(一般大于 4 倍以上),认为其保持不变,微分方程由常量表示。结合表 1 风电机组各状态量的时间常数可以看出,在 PMWT 机电暂态建模时可近似直流电压、机侧和网侧变流器电流进入稳态,用代数方程建模。网侧滤波器电流保持不变,用常量表示。

4 故障全过程机电暂态等值模型

4.1 模式 0 下的等值模型

由于风机对风速波动体现为低通滤波特性,且滤波时间常数较大,约为 10 s 级^[16],所以在机电暂态分析中风速可视为恒定。PMWT 在电网故障发生前的稳态过程中输出恒定的功率,同时电网电压为恒定值,因而 PMWT 的输出电流也保持恒定值。PMWT 输出电流 I_g 的表达式为:

$$I_g = \frac{P_g - jQ_g}{E_g^*} \quad (10)$$

式中, E_g^* 为网侧共轭电压矢量。

由式(10)可知,电流 I_g 为恒定值,因此 PMWT 在电网正常运行状态下可等值为恒流源。

4.2 模式 1 下的等值模型

由于电流内环的时间尺度远小于外环机电时间

尺度,且内环响应速度更快,因此变流器输出至电网的电流近似等于外环参考值。网侧变流器的时间尺度为 10 ms 级,在电力系统机电暂态稳定时间尺度内 PI 能跟踪上其暂态过程,同时由于积分控制的响应速度不及比例控制,因此机电暂态建模时忽略 PI 控制器积分环节,则根据式(7),可得:

$$\begin{cases} i_{gd} = k_{pu}(U_{dc}^* - U_{dc}) \\ i_{gq} = k_{pq}(Q_g^* - Q_g) \end{cases} \quad (11)$$

直流电压表达式为:

$$P_s - P_g = 0.5C \frac{du_{dc}^2}{dt} \quad (12)$$

式中, C 为直流电容值。

模式 1 下网侧 d、q 轴电流值为:

$$\begin{cases} i_{gd} = i_{gd_tim} \\ i_{gq} = i_{gq_tim} \end{cases} \quad (13)$$

式中, i_{gd_tim} 、 i_{gq_tim} 分别为网侧 d、q 轴电流实时值。

联立式(11)~式(13), PMWT 的复功率可写为:

$$S = P_s + \frac{C}{k_{pu}} \left(u_{dc}^* - \frac{i_{gd_tim}}{k_{pu}} \right) \frac{di_{gd_tim}}{dt} + j \left(Q_g^* - \frac{1}{k_{pq}} i_{gq_tim} \right) \quad (14)$$

所以,机端电压 U_g 可写为:

$$U_g = \frac{P_s + j \left(Q_g^* - \frac{1}{k_{pq}} i_{gq_tim} \right)}{I_g^*} + \frac{\frac{C}{k_{pu}} \left(u_{dc}^* - \frac{i_{gd_tim}}{k_{pu}} \right) \frac{di_{gd_tim}}{dt}}{I_g^*} \quad (15)$$

式中, I_g^* 为网侧共轭电流矢量。

由式(15)可见,机端电压受控于功率参考值及网侧输出电流,因此模式 1 下的 PMWT 可等值为受控电压源。

4.3 模式 2 下的等值模型

模式 2 下 chopper 未投入,但是网侧变流器输出电流已达到变流器电流限幅值,导致网侧变流器闭锁。根据风电机组并网导则无功要求确定 i_{gq} ,由网侧 d、q 轴电流和变流器电流限幅值的关系可得到网侧 d 轴电流^[21]:

$$\begin{cases} i_{gq} = 1.5(0.9 - U_T)I_N \\ i_{gd} = \sqrt{I_{\max}^2 - i_{gq}^2} \\ I_{\max} = (1.1 \sim 1.2)I_N \end{cases} \quad (16)$$

式中, U_T 为并网点电压标幺值; I_N 为发电机额定电

流幅值; I_{\max} 为网侧变流器电流限幅值。

联立式(11)、式(12)和式(16), PMWT 的机端电压可写为:

$$U_g = \frac{P_s + j \left(Q_g^* - \frac{1.35 - 1.5U_T}{k_{pq}} I_N \right)}{I_g^*} + \frac{\frac{d\sqrt{I_{\max}^2 - (1.35 - 1.5U_T)^2 I_N^2}}{dt}}{\frac{k_{pu} I_g^*}{Cu_{dc}^*} - \frac{\sqrt{I_{\max}^2 - (1.35 - 1.5U_T)^2 I_N^2}}{dt} \frac{d\sqrt{I_{\max}^2 - (1.35 - 1.5U_T)^2 I_N^2}}{dt}}{\frac{k_{pu}^2 I_g^*}{C}} \quad (17)$$

由式(17)可见,模式 2 下的 PMWT 可等值为受控电压源,和模式 1 等值模型的区别在于复功率的参考值不同。

4.4 模式 3 下的等值模型

模式 3 下 chopper 已投入,但是网侧输出电流小于变流器电流限幅值,因此网侧变流器处于未闭锁状态。相较于未投 chopper 状态,投入 chopper 电路后,PMWT 机电暂态特性的分析需考虑卸荷电路对直流电压的影响。

带 chopper 的 PMWT 中直流电压表达式为:

$$P_s - P_g - \frac{u_{dc}^2}{R_{ch}} = 0.5C \frac{du_{dc}^2}{dt} \quad (18)$$

式中, R_{ch} 为卸荷电路电阻值。

联立式(11)、式(13)和式(18), PMWT 的机端电压可写为:

$$U_g = \frac{P_s - \frac{1}{R_{ch}} \left(u_{dc}^* - \frac{i_{gd_tim}}{k_{pu}} \right)^2 + j \left[Q_g^* - \frac{1}{k_{pq}} i_{gq_tim} \right]}{I_g^*} + \frac{\frac{C}{k_{pu}} \left(u_{dc}^* - \frac{i_{gd_tim}}{k_{pu}} \right) \frac{di_{gd_tim}}{dt}}{I_g^*} \quad (19)$$

由式(19)可见,模式 3 下的模型仍可等值为受控电压源,和模式 1 等值模型相比,有功功率部分减去了卸荷电路的消耗功率。

4.5 模式 4 下的等值模型

在模式 4 下, chopper 已投入,网侧变流器运行于闭锁状态。由式(11)、式(16)和式(18), PMWT 的机端电压可写为:

$$\begin{aligned}
 U_g = & \frac{P_s - \frac{1}{R_{ch}} \left[u_{dc}^* - \frac{\sqrt{I_{\max}^2 - (1.35 - 1.5U_T)^2 I_N^2}}{k_{pu}} \right]^2}{I_g^*} + \\
 & \frac{j \left[Q_g^* - \frac{(1.35 - 1.5U_T)}{k_{pq}} I_N \right]}{I_g^*} + \\
 & \frac{d \sqrt{I_{\max}^2 - (1.35 - 1.5U_T)^2 I_N^2}}{dt} - \\
 & \frac{k_{pu} I_g^*}{C u_{dc}^*} \\
 & \frac{\sqrt{I_{\max}^2 - (1.35 - 1.5U_T)^2 I_N^2}}{C} \frac{d \sqrt{I_{\max}^2 - (1.35 - 1.5U_T)^2 I_N^2}}{dt} \\
 & \frac{k_{pu}^2 I_g^*}{C}
 \end{aligned} \quad (20)$$

由式(20)可知,模式4下的PMWT可等值为受控电压源。和模式3等值模型相比,复功率中网侧限流值不同。综合PMWT正常运行等值模型、chopper是否投切和网侧变流器是否闭锁下的5种等值模型,PMWT全过程机电暂态等值模型如图4所示。当PMWT处于正常运行阶段时,PMWT的等值模型为恒流源模型,输出的三相对称电流经升压变流入电网。当电网发生故障时,通过机端电压 U_g 判断chopper是否投入和网侧变流器是否闭锁,将PMWT等值为基于不同功率参考值的受控电压源。因此,PMWT的全过程机电暂态等值模型包括正常运行阶段的恒流源模型和故障切换后的等值受控电压源模型。

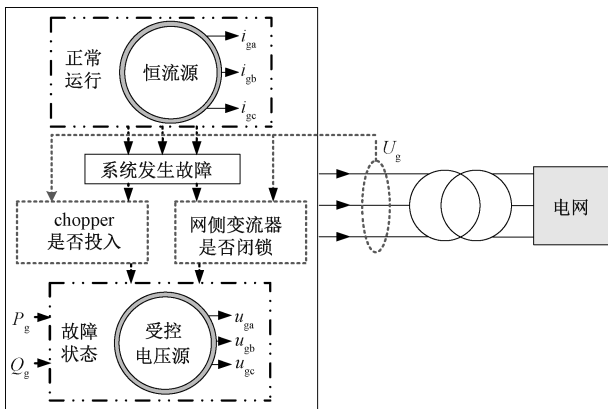


图4 PMWT全过程机电暂态等值模型

Fig.4 Full-process electromechanical transient equivalent model of PMWT

5 全过程机电暂态等值模型的切换

5.1 基于机端电压的chopper投切判据

在同步旋转dq坐标下,网侧变流器采用电压定向矢量控制,将机端电压矢量 U 定向在d轴上,有 $u_{gq}=0$ 。则网侧有功功率方程可写为:

$$P_g = 1.5 U_g i_{gd} \quad (21)$$

式中, U_g 为机端电压。

机电暂态研究的时间尺度为100 ms级以上,可近似网侧变流器PI能跟踪上其暂态过程,根据式(8),网侧内环控制方程可写为:

$$\begin{cases} u_{gd} = e_{gd} + \omega_e L_g i_{gq} \\ u_{gq} = e_{gq} - \omega_e L_g i_{gd} \end{cases} \quad (22)$$

根据式(12)、式(21)和式(22),可得chopper投切判据:

$$\begin{cases} U_{dcn}^{\text{ref}} < U_{dcn}^{\text{ref}} < U_{dcn}^{\text{ref}} \\ U_{dcn}^{\text{ref}} = \sqrt{\int_{t_0}^{t_0+n\Delta t} \left(\frac{2P_s}{C} - \frac{3e_{gq} U_g}{\omega_e L_g C} \right) dt} \end{cases} \quad (23)$$

式中, U_{dcn}^{ref} 为 n 个 Δt 时间下的卸荷电路使能电位; U_{dcn}^{ref} 为卸荷电路投入使能电位; U_{dcn}^{ref} 为卸荷电路退出使能电位; t_0 为机端电压开始变化的时刻; Δt 为直流电压的时间变化尺度; n 为 Δt 的个数。

式(23)中, Δt 可根据直流电压的时间常数选取。在直流电压的时间变化尺度内计算 U_{dcn}^{ref} ,并与设定阈值 U_{dcn}^{ref} 、 U_{dcn}^{ref} 作比较,进而判断是否对等值模型进行切换。

chopper投切逻辑流程图如图5所示,当风电机组机端电压发生跌落时,判断 $U_{dc1}^{\text{ref}} > U_{dcn}^{\text{ref}}$ 是否成立,成立则投入卸荷电路,不成立则判断 $U_{dc2}^{\text{ref}} > U_{dc1}^{\text{ref}}$,若成立则返回第三步,否则结束;退出卸荷电路阶段,若 $U_{dcn}^{\text{ref}} < U_{dcn}^{\text{ref}}$,则退出卸荷电路,否则返回第三步继续比较 U_{dcn}^{ref} 与设定阈值的大小。

5.2 基于机端电压的网侧变流器闭锁判据

根据电压矢量定向原则, $u_{gq}=0$,由网侧变流器输出的复功率、电压和电流的关系可得:

$$I_g^* = \frac{P_g + jQ_g}{U_g} \quad (24)$$

式中, I_g 为网侧电流的共轭值。

根据网侧变流器电流限幅值与电网电流的闭锁判据,当 $I_g > I_{\max}$ 时,网侧变流器闭锁。根据式(24)可得基于机端电压的网侧变流器闭锁判据:

$$U_g < \frac{P_g - jQ_g}{I_{\max}} \quad (25)$$

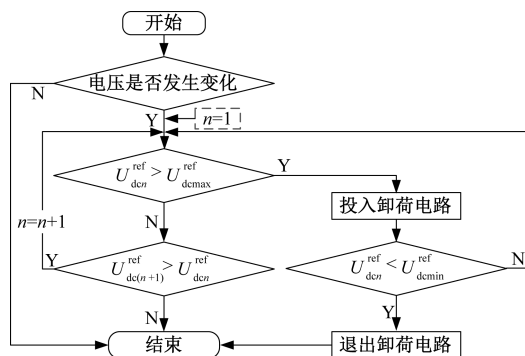


图5 chopper 投切逻辑流程图

Fig.5 Flow chart of chopper switching logic

当满足上述判据时,网侧变流器闭锁;否则网侧变流器处于正常运行模式。

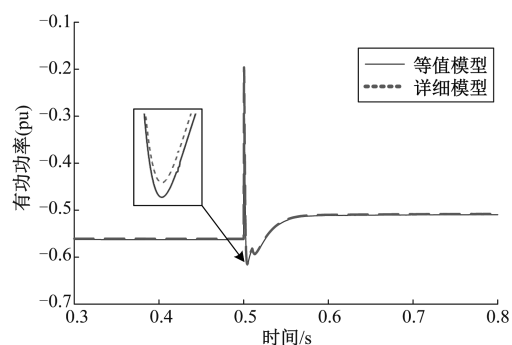
6 算例分析

为了验证文中提出的 PMWT 全过程机电暂态模型的正确性,在 Matlab/Simulink 下搭建了 PMWT 的详细仿真模型与所提出的等值模型进行比较。通过比较不同故障程度的三相短路故障时等值模型和详细模型的输出特性,以验证 PMWT 全过程机电暂态等值模型的正确性。详细模型参数如下:额定功率 $P_n = 2 \text{ MW}$,额定电压 $U_n = 690 \text{ V}$,极对数 $P = 30$,永磁体磁链 $\psi_f = 1.692 \text{ Wb}$,其他参数见表 2 和表 3。此外,网侧变流器电流限幅值为 $I_{\max} = 1.2I_N$,chopper 的动作阈值为 $U_{\text{dcmax}}^{\text{ref}} = 1.05U_{\text{dc}}^*$, $U_{\text{dcmin}}^{\text{ref}} = 1.02U_{\text{dc}}^*$ 。

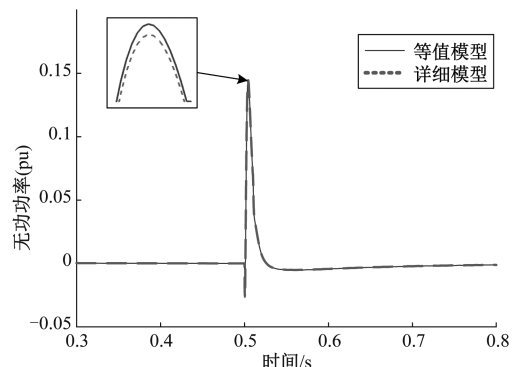
6.1 模式 1 下的等值模型

0.5 s 时电网发生三相短路故障,风电机组机端电压跌落至 0.9 pu。电压跌落程度较小时,根据切换条件可知 chopper 未投入,网侧变流器未闭锁。全过程机电暂态模型根据机端电压判断采用模式 1 的等值模型进行计算。PMWT 的详细模型和全过程机电暂态模型的输出特性如图 6 所示。其中,虚线为详细模型的输出,实线为全过程机电暂态模型的输出。

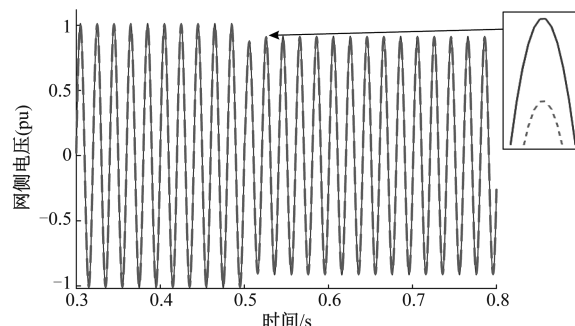
图 6 中,故障发生时刻,PMWT 的有功输出和电压发生跌落,根据电网导则无功要求,故障期间 PMWT 的无功输出有所增加。详细模型和全过程机电暂态模型的有功、无功、电压、电流输出特性基本一致。等值模型有功的误差不超过 0.5%,无功误差不超过 0.5%,电压误差不超过 1%,电流误差不超过 5%。产生误差的主要原因是等值模型只考虑了变流器的线性特性,忽略了调节延时、过调制等非线性因素。



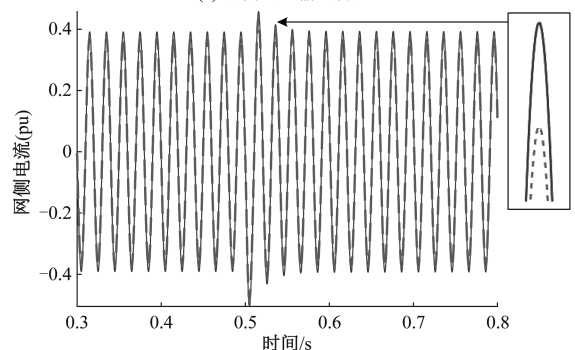
(a) 有功功率输出特性



(b) 无功功率输出特性



(c) 网侧电压输出特性



(d) 网侧电流输出特性

图6 三相对称故障下电压跌落至 0.9 pu 特性对比

Fig.6 Comparison of characteristics of voltage drop to 0.9 pu under three-phase symmetry fault

性因素。全过程机电暂态模型的误差均在允许范围内,能够准确模拟机组的输出特性。

6.2 模式3下的等值模型

0.5 s 时电网发生三相短路故障,风电机组机端电压跌落至 0.5 pu。此时,电压跌落程度较大,chopper 投入,网侧变流器未闭锁。全过程机电暂态模型根据机端电压判断采用模式3的等值模型进行计算。PMWT 的详细模型和全过程机电暂态模型的输出特性如图7所示。

由图7可知,详细模型和机电暂态等值模型的有功、无功、电压、电流输出特性基本一致。等值模型有功的误差不超过 0.3%,无功误差不超过 0.3%,电压误差不超过 1%,电流误差不超过 5%。在故障开始时刻,输出特性有部分差异,主要原因是故障发生瞬间电压跌落较大,触发卸荷电路的投入,对风电机组的输出影响较大,电压、电流产生了一部分超调量,进而导致功率在该时刻的突变。

6.3 模式4下的等值模型

0.5 s 时电网发生三相短路故障,风电机组机端电压跌落至 0.3 pu。此时 chopper 投入且网侧变流器闭锁。全过程机电暂态模型根据机端电压判断采用模式4的等值模型进行计算。PMWT 的详细模型和全过程机电暂态模型的输出特性如图8所示。

由图8可知,详细模型和全过程机电暂态模型的有功、无功、电压、电流输出特性基本一致。等值模型有功的误差不超过 0.5%,无功误差不超过 1.5%,电压误差不超过 1%,电流误差不超过 5%。与模式3类似,在电压跌落程度较大的情形下,网侧输出有功的跌落程度更大,因此所需要的无功支撑也就越大,此时卸荷电路投入和变流器闭锁,对风电机组的输出影响增大,进而误差增大。但是,误差仍然位于允许范围内,全过程机电暂态模型能够准确模拟机组的输出特性。

6.4 模式2下的等值模型

改变网侧电流的限幅值为 $I_{\max} = 1.1I_N$ 。0.5 s 时电网发生三相短路故障,风电机组机端电压跌落至 0.7 pu。此时,chopper 未投入,网侧变流器闭锁。全过程机电暂态模型根据机端电压判断采用模式2的等值模型进行计算。PMWT 的详细模型和全过程机电暂态模型的输出特性如图9所示。

由图9可知,故障发生时刻,PMWT 的有功和无功输出较模式1出现了部分振荡。故障期间 PMWT 的有功输出减小,无功输出有所增加。详细模型和全过程机电暂态模型的有功、无功、电压、电流输出

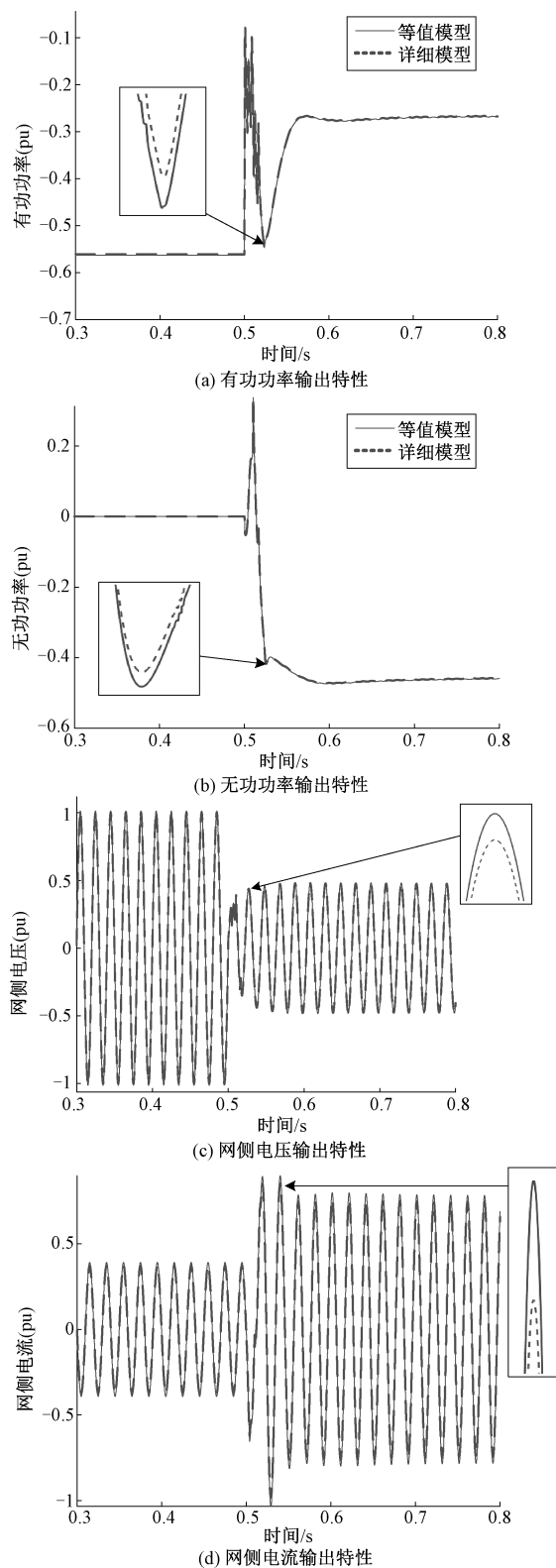


图7 三相对称故障下电压跌落至 0.5 pu 特性对比
Fig.7 Comparison of characteristics of voltage drop to 0.5 pu under three-phase symmetry fault

特性同样基本一致。等值模型有功的误差不超过 2%,无功误差不超过 0.5%,电压误差不超过 1%,电

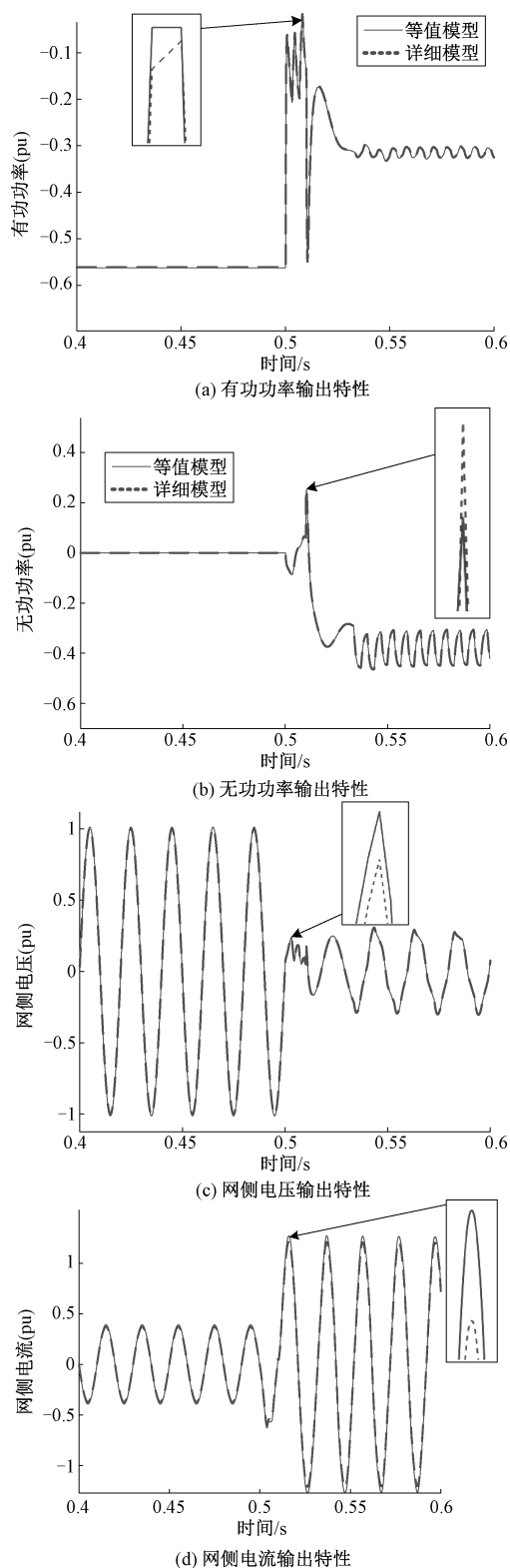


图8 三相对称故障下电压跌落至0.3 pu特性对比

Fig.8 Comparison of characteristics of voltage drop to 0.3 pu under three-phase symmetry fault

流误差不超过5%,此时的误差来源主要是变流器的特性影响。全过程机电暂态模型的误差均在允许

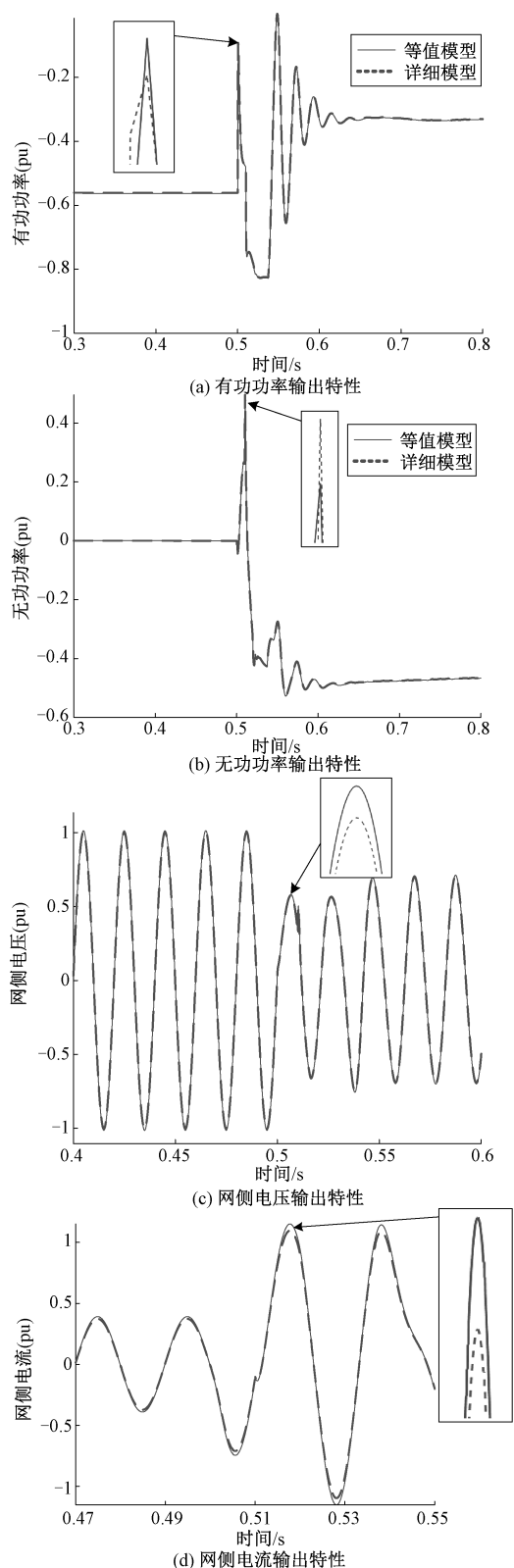


图9 三相对称故障下电压跌落至0.7 pu特性对比

Fig.9 Comparison of characteristics of voltage drop to 0.7 pu under three-phase symmetry fault

范围内,能够准确模拟机组的输出特性。

6.5 不同模式下等值模型的切换

图 10 为 PMWT 在不同模式下等值模型切换的输出电压、电流波形,由图 10(a)可知,网侧电压在 0.5 s 时跌落至 0.9 pu,此时风电机组运行于模式 1,在 1 s 时故障程度加深,电压跌落至 0.5 pu,由判

据式 (23) 可得 $U_{den}^{ref} = 1\ 263\ V > U_{demax}^{ref}$ 时卸荷电路投入,此时卸荷电路投入,式 (25) 可得 $U_g < 0.42\ pu$ 时变流器闭锁,此时网侧变流器未闭锁,风电机组进入模式 3,模式 1 到模式 3 的切换验证了 chopper 投切判据的正确性。

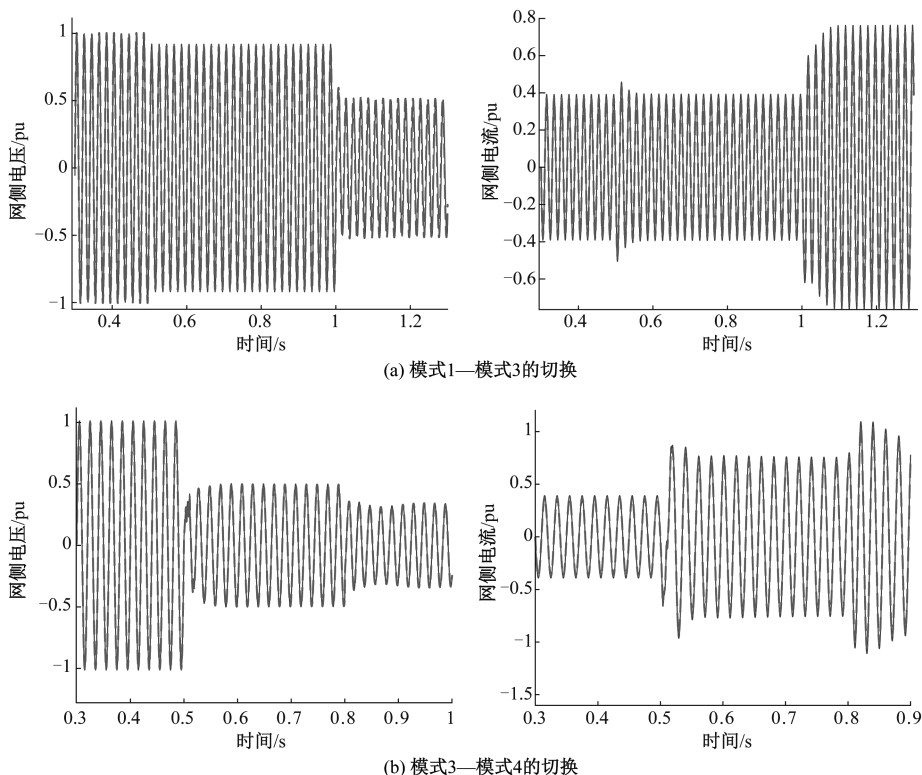


图 10 不同模式下等值模型的切换

Fig.10 Switching of equivalent models in different modes

由图 10(b)可知,网侧电压在 0.5 s 时跌落至 0.5 pu,此时风电机组运行于模式 3,在 0.8 s 时电压进一步跌落至 0.3 pu,由判据式 (25) 可知网侧变流器闭锁,风电机组进入模式 4,模式 3 到模式 4 的切换验证了网侧变流器闭锁判据的正确性。网侧电流输出波形与判据得到的结果一致。同时等值模型切换后的网侧电压、电流与对应模型的输出特性基本一致,进而验证了不同模式下等值模型的正确性。

7 结论

针对 PMWT 机电暂态特性难以准确模拟的问题,文中考虑了变流器控制响应特性以及低电压穿越影响下 PMWT 的故障多状态性,提出了 PMWT 的机电暂态全过程建模思想,建立了 PMWT 各个状态下基于不同功率参考值的等值模型,并推导了基于 PMWT 机端电压的 chopper 投切和网侧变流器闭锁判据,建立了 PMWT 全过程机电暂态

等值模型。最后通过仿真对比了 PMWT 详细模型和全过程机电暂态模型各状态下的输出特性,验证了全过程机电暂态模型应用于电力系统暂态稳定分析的准确性,对提高含 PMSG 的电力系统分析计算效率和风电场接入系统的稳定分析计算具有一定的指导意义。

参考文献 (References):

- [1] Blaabierg F, Ma K. Wind energy systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105 (11): 2116-2131.
- [2] 程淳, 张阳, 邓木生 (Cheng Zhun, Zhang Yang, Deng Musheng). 基于阻抗源逆变器的永磁直驱风力发电变流系统综述 (Review of permanent magnet direct drive wind power conversion system with impedance-source inverter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (6): 57-67.
- [3] 夏玥, 李征, 蔡旭, 等 (Xia Yue, Li Zheng, Cai Xu,

- et al.). 基于直驱式永磁同步发电机组的风电场动态建模 (Dynamic modeling of wind farm composed of direct-driven permanent magnet synchronous generators) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (6): 1439-1445.
- [4] Geng Hua, Xu Dewei (David). Stability analysis and improvements for variable-speed multipole permanent magnet synchronous generator-based wind energy conversion system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2 (4): 459-467.
- [5] 辛建波, 舒展, 赵诗萌, 等 (Xin Jianbo, Shu Zhan, Zhao Shimeng, et al.). 双馈-直驱混合风电场次同步振荡影响因素分析 (Research on influencing factors of DFIG-PMSG hybrid wind farm sub-synchronous oscillations) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (11): 24-32.
- [6] 李辉, 陈宏文, 杨超, 等 (Li Hui, Chen Hongwen, Yang Chao, et al.). 并网异步风电机组有功功率的振荡频率分析 (Analysis of oscillation frequency for active power of a grid-connected asynchronous wind turbine generator system) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2011, 39 (16): 13-18.
- [7] 苗风麟, 施洪生, 张小青 (Miao Fenglin, Shi Hongsheng, Zhang Xiaoqing). 风力发电机组多领域耦合模型及动态响应分析 (Modelling of wind turbines coupled in multi-domain and dynamic response analysis) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (7): 1704-1712.
- [8] 张磊, 朱凌志, 姜达军, 等 (Zhang Lei, Zhu Lingzhi, Jiang Dajun, et al.). 直驱风电机组模型构建方法及其实现 (Modelling approach and implementation of direct-drive wind turbine) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (11): 3474-3481.
- [9] 夏安俊, 乔颖, 鲁宗相, 等 (Xia Anjun, Qiao Ying, Lu Zongxiang, et al.). 直驱型风电场聚合模型误差对电力系统暂态稳定分析的影响 (Effects of aggregated PMSG wind farm model error on transient stability analysis of power systems) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (2): 341-347.
- [10] 刘忠义, 刘崇茹, 李庚银 (Liu Zhongyi, Liu Chongru, Li Gengyin, et al.). 适用于暂态稳定分析的直驱永磁风机建模研究 (Modeling study of PMSG for transient stability analysis) [J]. 电网与清洁能源 (Power System and Clean Energy), 2016, 32 (2): 96-102.
- [11] 安邦, 韩平平, 丁明, 等 (An Bang, Han Pingping, Ding Ming, et al.). 直驱永磁同步风电机组电磁暂态模型降阶分析 (Analysis of the electromagnetic transient reduced model of direct drive permanent magnet synchronous wind power generation) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation), 2017, 29 (4): 60-65.
- [12] 蔺红, 晁勤 (Lin Hong, Chao Qin). 直驱永磁同步风力发电系统的降阶模型研究 (Analysis and research on reduced model of direct-drive permanent magnet wind power generation system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2012, 36 (8): 145-151.
- [13] 杨越, 何伟, 张妍, 等 (Yang Yue, He Wei, Zhang Yan, et al.). 基于 PSCAD 的永磁直驱风电机组简化模型研究 (Research of direct-driven permanent-magnet synchronous generator simplified model based on PSCAD) [J]. 水电能源科学 (Water Resources and Power), 2015, 33 (5): 160-164.
- [14] 任永峰, 胡宏彬, 薛宇, 等 (Ren Yongfeng, Hu Hongbin, Xue Yu, et al.). 基于卸荷电路和无功优先控制的永磁同步风力发电机组低电压穿越研究 (Low voltage ride-through capability improvement of PMSG based on chopper circuit and reactive priority control) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (1): 11-18.
- [15] 李朋宇, 何山, 王松, 等 (Li Pengyu, He Shan, Wang Song, et al.). 直驱风机 HVRT 两种直流侧卸荷方法对比仿真研究 (Comparative simulation analysis of PMSG HVRT on two different choppers) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2018, 55 (22): 7-12.
- [16] 张琛, 李征, 蔡旭, 等 (Zhang Chen, Li Zheng, Cai Xu, et al.). 面向电力系统暂态稳定分析的双馈风电机组动态模型 (Dynamic model of DFIG wind turbines for power system transient stability analysis) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (20): 5449-5460.
- [17] 王永强, 喻俊志, 冯静安, 等 (Wang Yongqiang, Yu Junzhi, Feng Jingan, et al.). 永磁直驱风电机组低/高电压穿越研究 (Research on low/high voltage ride through of permanent magnet synchronous wind turbine) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2018, 46 (9): 34-42.
- [18] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等 (Li Heming, Dong Shuhui, Wang Yi, et al.). 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制 (Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (5): 73-81.

- [19] 张慧玲,郝思鹏,袁越,等 (Zhang Huiling, Hao Sipeng, Yuan Yue, et al.). 基于实测数据的双馈风电机组外特性研究及简化建模 (Research on external characteristics of DFIG and simplified modeling based on testing data) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2013, 41 (17): 82-87.
- [20] 解大,冯俊淇,娄宇成,等 (Xie Da, Feng Junqi, Lou Yucheng, et al.). 基于三质量块模型的双馈风机小信号建模和模态分析 (Small-signal modelling and modal analysis of DFIG-based wind turbine based on three-mass shaft model) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (Sup.): 21-29.
- [21] 李建林,胡书举,孔德国,等 (Li Jianlin, Hu Shuju, Kong Deguo, et al.). 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究 (Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2008, 32 (19): 92-95.

Equivalent modeling method of whole electromechanical transient state of permanent magnet direct-drive wind turbine under grid fault

YANG Min-cai¹, YU Jian-feng², OUYANG Jin-xin², XIA Han-lin¹, YAO Jun²

(1. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 404100, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: With the increase of wind power penetration rate, the impact of large-scale wind power integration on grid transients is increasing, so it is urgent to establish an electromechanical transient model of permanent magnet direct-drive wind turbines (PMWT) that can be used for transient stability analysis of large-scale power systems. At present, the detailed models and simplified models of PMWT have been studied in depth, however, the multi-state characteristics of the wind turbine operating conditions under grid faults is ignored, so it is difficult to accurately simulate the external characteristics of PMWT through simplified and equivalent methods, severely restricting the electromechanical transient analysis of the power system containing new energy generation. For this reason, this paper considers the control response characteristics of the converter and the impact of low voltage ride through, analyzes the multi-state characteristics of PMWT under grid faults, proposing an idea of the electromechanical transient full-process modeling of PMWT, then establishing the electromechanical transient equivalent model of PMWT under various states, and the electromechanical transient equivalent model of PMWT is established during the whole fault process by deriving the state switching conditions. Finally, the effectiveness of the equivalent model is verified by simulation.

Key words: permanent magnet direct-drive wind turbine; the electromechanical transient; equivalent modeling; multi-state characteristics; grid fault