

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.06.004

电网电压对称跌落下 Z 源永磁直驱风电系统的运行与控制研究

程 淳¹, 邓木生¹, 王连芳², 张 阳¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 广西电网有限责任公司 南宁供电局, 广西 南宁 530031)

摘 要: 在 Z 源风力发电系统中, 当电网电压发生对称跌落时, 会导致 Z 源网络电容电压上升和交流侧过电流, 严重威胁风电机组和变流器的安全, 破坏系统的稳定运行。针对这一问题, 提出一种适用于 Z 源永磁直驱发电系统在电网电压对称跌落情况下的故障穿越策略。详细分析了 Z 源永磁直驱系统的工作原理, 建立了 Z 源逆变器的数学模型。在电网电压正常情况下, 运用 Z 源电容电压外环控制和电流内环控制的双闭环控制策略, 实现 Z 源风力发电系统的单位功率因数并网运行; 在电网电压发生三相对称跌落的情况下, 分析功率流动情况, 将耗能 crowbar 电路并联在 Z 源网络输入端, 以实现系统的低电压穿越, 从而保持恒定的 Z 源电容电压和稳定的交流侧电流。最后, 在 Matlab/Simulink 中搭建模型进行系统仿真, 仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: Z 源逆变器; 风力发电; 低电压穿越; 耗能 crowbar

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)06-0021-07

Research on the Operation and Control of Z-Source Wind Power Generation System Under Grid Voltage Symmetry Faults

CHENG Zhun¹, DENG Musheng¹, WANG Lianfang², ZHANG Yang¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Nanning Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Company Limited, Nanning 530031, China)

Abstract: A symmetrical drop in power grid voltage in the Z source wind power generation system will lead to an increase of the capacitor voltage of Z-source network as well as the occurrence of AC-side current, thus seriously threatening the safety of wind turbines and converters, and destroying the stable operation of the system. In view of the above-mentioned problems, a proposal has been made of a fault ride-through strategy for permanent magnet direct drive power generation system with Z source under symmetrical drop in voltage. A detailed analysis has been made of the working principle of Z source permanent magnet direct drive system, followed by the establishment of the mathematical model of Z source inverter. Under the normal voltage of the power grid, the dual closed loop control strategy of the Z source capacitor voltage outer loop control and the current loop control is used to realize the unit power factor of the Z source wind power generation system. In the case of the three-phase symmetry drop of the grid voltage, an analysis has been made of the power flow situation. The low voltage crossing of the system can be achieved with a parallel between the energy dissipation crowbar circuit and the input terminal of the Z source network, thus maintaining a constant Z source voltage and stable AC side current. Finally, a model is to be built in Matlab/Simulink to simulate the system, with its results verifying the effectiveness of the proposed method.

收稿日期: 2017-12-18

基金项目: 株洲市科技计划基金资助项目(株科发[2017]68号)

作者简介: 程 淳(1988-), 女, 湖南长沙人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代电力电子技术及系统,
E-mail: zhuntuotuo@163.com

通信作者: 张 阳(1988-), 男, 山东潍坊人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事电力电子与新能源发电方面的教学与研究, E-mail: yywszy@163.com

Keywords: Z-source inverter; wind power generation; low voltage ride through (LVRT); energy consumption crowbar

1 研究背景

近年的研究中,永磁直驱风力发电机组的变流器拓扑结构主要包括图1所示3种^[1-3]。

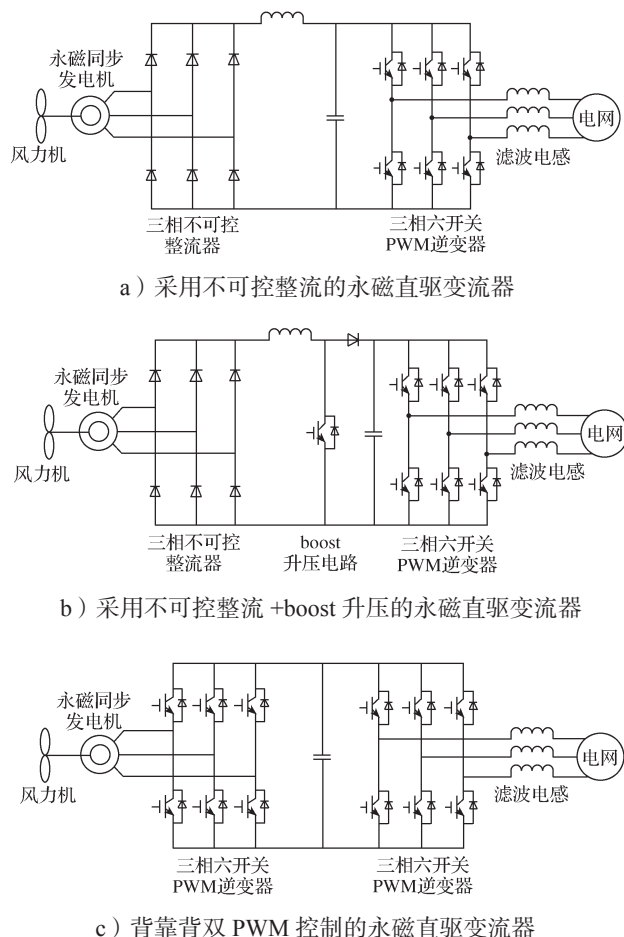


图1 永磁直驱风力发电系统的常用变流器拓扑结构

Fig.1 Common converter topology of direct-drive permanent magnet wind power generation system

1) 三相不可控整流+三相脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)逆变器,其拓扑结构如图1a所示。由于该拓扑结构不具备升压能力,因此要求发电机输出更高的线电压,从而提高了对发电机定子绝缘水平和器件耐压能力的要求。

2) 机侧采用不可控整流+boost升压,网侧采用PWM逆变器,其拓扑结构如图1b所示。这种电路的两级结构会降低系统效率,且增加了系统成本,因而在实际应用中受到限制。

3) 三相PWM整流+三相PWM逆变器,其拓扑结构如图1c所示。因该变流器采用背靠背PWM

的结构,导致系统成本大大增加。

图1所示3种拓扑结构中,若逆变器的上下管直通,则将损坏开关管^[4]。为了避免这一情况的发生,通常会在脉冲波中加入死区时间。但死区时间的加入会影响并网的电流波形,使得并网的电流波形产生畸变,导致逆变器的调制度下降。

三相Z源逆变器是近年来新出现的一种电力电子变换装置^[5-6],具有单级拓扑结构,升降压较为灵活,抗电磁干扰能力较强等优点。因此,采用Z源结构可以使永磁直驱风力发电变流系统在不增加有源器件的前提下,实现升压功能^[7]。此外,Z源逆变器的直通状态是通过上下桥臂直通实现的,避免了插入死区时间引起的波形畸变,将Z源逆变器应用于风力发电系统为提高系统的稳定性提供了新的思路^[8-12]。

文献[8]将三相Z源逆变器应用于直驱永磁风力发电系统,建立了其并网模型,并推导了电压的约束方程;文献[9]将单相Z源逆变器应用于直驱永磁风力发电系统中,实现了Z源网络电容电压的稳定;文献[10]首先通过直通占空比的控制对发电机转速进行调节,随后实现了基于Z源逆变器的永磁直驱风力发电系统的最大功率点跟踪;文献[11]和文献[12]将直通占空比融入调制策略中,实现了基于Z源逆变器的永磁直驱风力发电系统的双闭环控制。

可见,现有的关于Z源逆变器在永磁直驱风力发电系统中的应用研究,多是针对电网电压正常情况下进行的,而针对变直通占空比下Z源永磁直驱风力发电系统低电压穿越方面的研究较为少见。随着Z源逆变器在风力发电中的应用不断增加,基于Z源逆变器的永磁直驱风力发电系统同样要考虑其低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力^[13-14],不仅要求故障时Z源网络电容电压不大幅升高,还要求系统继续向电网输送功率,不脱网运行。

因此,本文拟针对Z源逆变器在直驱永磁系统中的运行特性,提出一种电网电压对称跌落下Z源永磁直驱风电系统的控制方法。常规并网,采用转速外环,电流内环实现直通占空比的获取,采用电压、电流双闭环控制实现Z源网络电容电压稳定和功率因数并网。当电网电压故障时,通过对故障下系统的功率流进行分析,发现故障时多余的能量流入了Z源网络电容和Z源网络电感,随后,提出将

crowbar 电路连接到 Z 源网络输入端的方案。最后, 运用 Matlab/Simulink 软件进行系统仿真, 以验证所提系统控制的有效性。

2 Z 源逆变器运行原理

图 2 是采用三相 Z 源电压型逆变器的风力发电系统的拓扑结构图。图中 V_0 是 Z 源网络的直流端输入电压; V_{PN} 为逆变器交流侧输入相电压峰值, 即 Z 源逆变器直流侧母线输出电压峰值; VTn ($n=1\sim6$) 为逆变器的 6 个开关管; e_a, e_b, e_c 分别为三相并网电压; i_a, i_b, i_c 分别为三相并网电流。可见, 该系统电路由永磁同步发电机 (permanent magnet synchronous generator, PMSG)、二极管整流器、稳压电容、Z 源阻抗网络、逆变桥以及交流电源等组成。

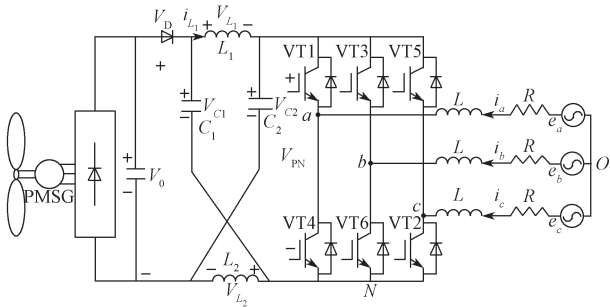
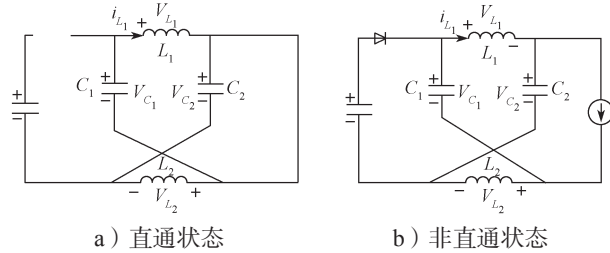


图 2 基于 Z 源逆变器的永磁直驱风电系统拓扑结构
Fig. 2 Topology of direct-drive permanent magnet wind power generation system based on Z-Source inverter

传统的三相逆变器有 8 个开关状态, 即 6 个有效电压矢量状态和 2 个零电压矢量状态。而图 2 中, 三相 Z 源逆变器有第 9 个开关状态, 即同一桥臂上下两个开关器件同时导通状态, 也称为直通零矢量状态。传统的三相逆变器工作时, 上下管的导通必须留有一定的死区时间, 即不允许出现上下桥臂直通状态, 而 Z 源逆变器则刚好是利用这第 9 个开关状态来达到独特的升降压特性效果。

Z 源逆变器工作状态的等效电路如图 3 所示。



a) 直通状态 b) 非直通状态
图 3 Z 源逆变器工作状态的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of the working state of Z-source inverter

当 Z 源逆变器在直通状态下工作时, 其等效电路如图 3a 所示, 此时逆变器可以相当于短路。当 Z

源逆变器在非直通状态工作时, 其等效电路如图 3b 所示, 此时逆变桥臂可等效为一个电流源。

假设 Z 源为对称网络, 且电感 L_1, L_2 值相等, 电容 C_1, C_2 值相等, 且都为理想器件, 则有:

$$\begin{cases} V_{C_1} = V_{C_2} = V_C, \\ V_{L_1} = V_{L_2} = V_L, \\ i_{L_1} = i_{L_2} = i_L \circ \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_C 为 Z 源网络的电容电压; V_L 为 Z 源网络电感电压; i_L 为 Z 源网络电感电流。

由 Z 源逆变器的工作特性可知:

$$V_{PN} = \frac{1}{1-d_0} V_C = \frac{1}{1-2d_0} V_0, \quad (2)$$

$$V_C = \frac{1-d_0}{1-2d_0} V_0, \quad (3)$$

$$\bar{V}_{PN} = V_C \circ \quad (4)$$

式 (2) ~ (4) 中: \bar{V}_{PN} 为逆变器交流侧输入相电压的平均值; d_0 为直通占空比。

当 Z 源逆变器用于永磁直驱式风力发电系统时, 其交流侧电压是不变的, 可以通过适当调节 d_0 使得 Z 源输入直流电压高于或者低于交流电压值, 从而达到宽转速范围运行的目的。

3 Z 源逆变器正常并网控制策略

定义单极性二值逻辑开关函数上桥臂导通下,

$$S_k = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断;} \\ 0, & \text{上桥臂关断, 下桥臂导通;} \end{cases} \quad (k = a, b, c).$$

忽略三相 PWM 变换器开关管的通断损耗, 根据基尔霍夫定律 (Kirchhoff laws, KCL), 建立如下三相 PWM 逆变器回路方程:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = e_a - (V_{PN} S_a + V_{NO}) - i_a R, \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b - (V_{PN} S_b + V_{NO}) - i_b R, \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c - (V_{PN} S_c + V_{NO}) - i_c R \circ \end{cases} \quad (5)$$

式中: S_a, S_b, S_c 分别为开关函数; V_{NO} 为 N、O 两点电压。

通过锁相回路 (phase locked loop, PLL) 获得电网电压相角、幅值和频率。将上述方程转换到同步旋转 d, q 坐标系下, 有

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d - V_{PN} S_d - i_d R + \omega L i_q, \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q - V_{PN} S_q - i_q R + \omega L i_d \circ \end{cases} \quad (6)$$

式中： i_d 、 i_q 分别为电网电流直轴分量和电网电流交轴分量； S_d 、 S_q 分别为 d 、 q 坐标系下开关状态矢量； ω 为电网电压角频率。

$$\text{在式(6)中, 令} \begin{cases} V_d = V_{PN} S_d, \\ V_q = V_{PN} S_q. \end{cases} \quad (7)$$

式中， V_d 、 V_q 分别为逆变器交流侧 d 、 q 轴电压矢量。

当采用PI控制器和状态反馈解耦控制时，可以得到如下 V_d 、 V_q 的控制方程：

$$\begin{cases} V_d = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d, \\ V_q = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_q^* - i_q) - \omega L i_d + e_q. \end{cases} \quad (8)$$

式中： K_p 、 K_i 是比例和积分的增益； i_d^* 、 i_q^* 为交流侧 d 、 q 轴电流给定值； s 为拉普拉斯算子。

由式(2)~(4)可知，Z源网络直流链电压的平均值实际上就是Z源网络电容电压的稳态值，因此，可将Z源网络电容电压作为直流母线电压，且当Z源网络电容电压不变的情况下，可通过改变直通占空比改变Z源网络的输入电压，从而实现对发电机转速的控制。

令 d 轴方向为电网电压方向，则有：

$$\begin{cases} e_d = U_m, \\ e_q = 0. \end{cases} \quad (9)$$

式中 U_m 为电网相电压幅值。

网侧变换器输出给电网的有功功率和无功功率如下：

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = \frac{3}{2} U_m i_d, \\ Q = \frac{3}{2}(u_q i_q - u_d i_d) = -\frac{3}{2} U_m i_q. \end{cases} \quad (10)$$

d 轴控制直流母线， q 轴控制功率因数。当功率因数角为0时，可实现单位功率因数，即 i_q^* 恒为零。网侧变换器的控制框图如图4所示。

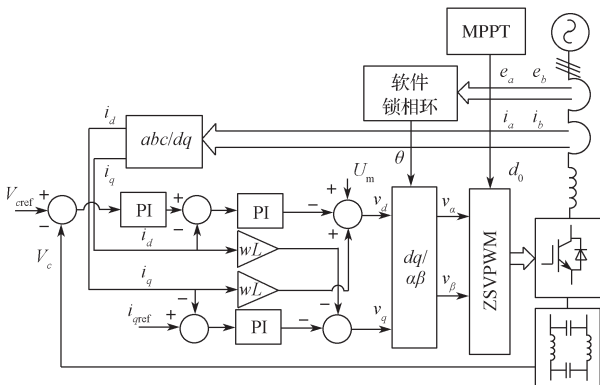


图4 系统双闭环解耦控制框图

Fig. 4 Control block diagram of double closed loops

4 低电压穿越控制策略

电力系统运行经验表明，三相短路故障较单相故障和两相故障而言，虽然出现的概率最小但其对电网造成的影响更加严重。且在采用对称分量法后，一切的不对称故障都可以归为对称故障处理。故本文针对三相短路故障下的Z源永磁直驱风电系统进行研究。

当电网电压由正常值 u_{sd} 跌落至故障下 u_{sd}' 时，机侧三相不可控整流器的输出电压不变，网侧Z源逆变器的并网电流从正常值 i_{sd} 变化至 i_{sd}' ，此时，并网功率为

$$P = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sd} = \frac{3}{2} u_{sd}' i_{sd}', \quad (11)$$

实际上，由于PI调节器的反向调节超调，此时瞬时的有功电流为 i_{sd}'' ，且 $i_{sd}'' < i_{sd}'$ 。则有

$$P = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sd} > \frac{3}{2} u_{sd}' i_{sd}'', \quad (12)$$

根据功率平衡原则，有

$$P = \frac{3}{2} u_{sd}' i_{sd}'' + \Delta P. \quad (13)$$

由式(13)可知，当电网电压发生对称跌落时，发电机发出的功率与Z源逆变器的并网功率出现了不平衡，这个功率差将导致Z源网络电容电压的快速升高。此外，由于全功率变流器将电网和发电机进行了隔离，因此，故障时发电机并未受到影响，仍然根据指令发出相应的功率，而此时，Z源逆变器的并网电流将上升，若不加处理，必将损坏变流器的开关器件。

为了平衡机侧功率和网侧功率，既可以采用crowbar电路释放Z源网络多余的能量，也可以对发电机的转速进行控制，减少输出功率，然而电网电压的故障时间相对较短，发电机转速的响应速度很难与之进行匹配。因此，本文采用图5所示的结构释放Z源网络中的能量。

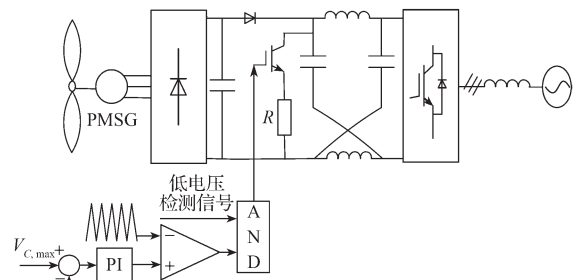


图5 低电压穿越控制拓扑图

Fig. 5 Control topology of LVRT

当电网电压发生故障时，通过设定的Z源网络电压最大值 $V_{C, \max}$ 来决定crowbar电路是否动作，通

过电压环 +SPWM 的方法实现对 crowbar 电路中开关器件触发脉冲的生成。

$$R = V_{C, \max}^2 / \Delta P, \quad (14)$$

式中: $V_{C, \max}$ 为设定的 Z 源网络电容电压上限; ΔP 为机侧变流器和网侧变流器的功率差。

该功率差可表示如下:

$$\Delta P = \frac{1}{2} C \frac{d(V_{C, \max}^2)}{dt}, \quad (15)$$

$$\Delta P = \Delta V I_{C, \max}, \quad (16)$$

令两式相等, 可得

$$\Delta V = \frac{C}{2 I_{C, \max}} \frac{d(V_{C, \max}^2)}{dt}. \quad (17)$$

式中: $I_{C, \max}$ 为 Z 源电容最大电流; C 为 Z 源电容。

5 仿真结果与分析

为了验证本文所提低电压穿越控制方法的正确性, 在 Matlab/Simulink 中进行 Z 源永磁直驱风电系统的仿真, 仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

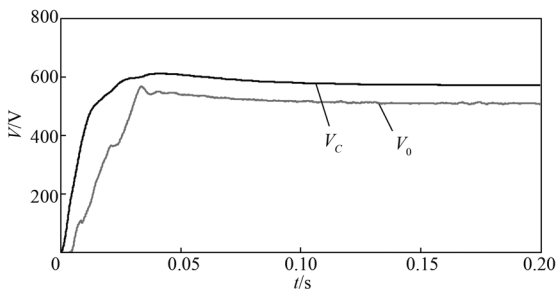
Table 1 Simulation parameters

参 数	取 值	参 数	取 值
Z 源网络电容 ($C_1=C_2$)/mF	2.04	电网线电压峰值 /V	380
Z 源网络电感 ($L_1=L_2$)/mH	5	PMSG 定子电阻 / Ω	2.875
PMSG 额定转速 / ($r \cdot \min^{-1}$)	3 000	PMSG 极对数	2
PMSG 电机 d/q 轴电感 ($L_d=L_q$)/mH	8.5	滤波稳压电容 / μF	500
		耗能电阻 / Ω	0.47
PMSG 永磁体磁链 Ψ_f /Wb	0.698 35		

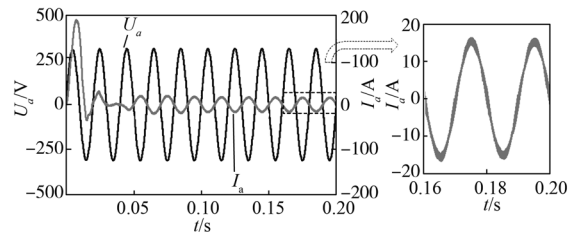
5.1 电网电压正常双闭环控制仿真分析

初始设定 Z 源电容电压给定值为 $V_c^*=573 \text{ V}$, 直通占空比 $d_0=0.1$, 最终经过 Z 源逆变器并入电压有效值为 220 V 的交流电网中。

图 6 是在电网电压正常的情况下, 直通占空比 $d_0=0.1$ 时的系统仿真波形。由图可知, 当直通占空比为 0.1, Z 源网络电容电压为 573 V 时, Z 源网络输入电压为 510 V, 且并网电流正弦度良好, 实现了单位功率因数并网。



a) Z 源电容电压和不控整流输出电压波形



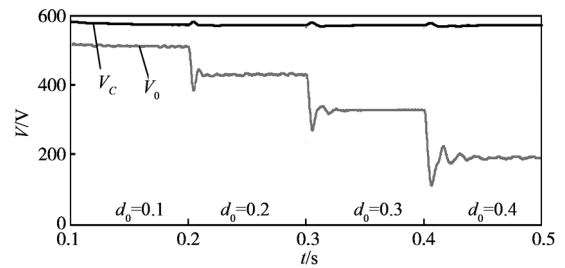
b) 网侧 a 相电压、电流波形

图 6 电网电压正常下系统仿真波形

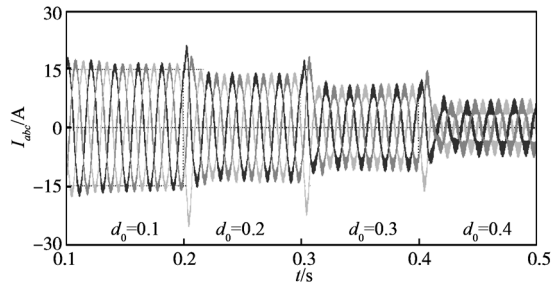
Fig. 6 Waveforms under the normal grid voltage

5.2 电网电压正常动态仿真分析

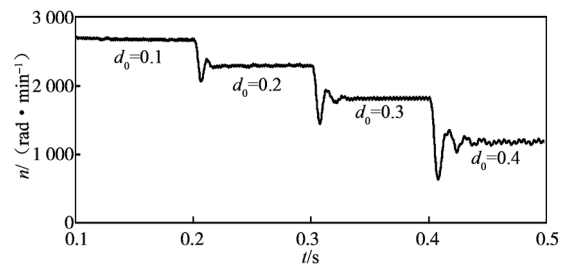
图 7 为 4 种不同直通占空比 (分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4) 时, 系统各处的仿真波形图。



a) Z 源电容电压及不控整流输出电压



b) 网侧三相电流



c) PMSG 转速

图 7 不同占空比下系统各处的变化波形

Fig. 7 Waveforms with changing values of d_0

由图 7a 可知, 当直通占空比改变时, Z 源网络的输入电压相应改变, 且动态性能良好, 由图 7b 和图 7c 可知, 当直通占空比变化时, 由于改变了发电机转速, 因此并网电流的幅值也相应变化。

综上, 图 7 表明: 通过对直通占空比的控制可改变 Z 源网络的输入电压, 进而改变发电机的转速和并网功率, 由仿真波形可知, 系统的动态响应快, 稳定相良好。

5.3 低电压穿越仿真

图8为电网电压波形,可看到电压幅值在0.2s时三相电压对称跌落到20%,0.4s时恢复。

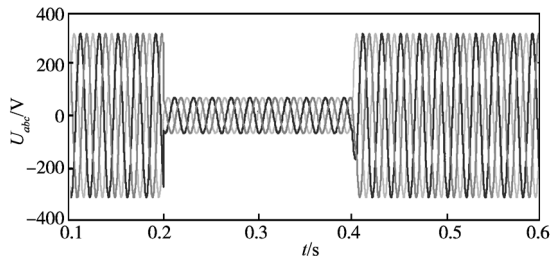
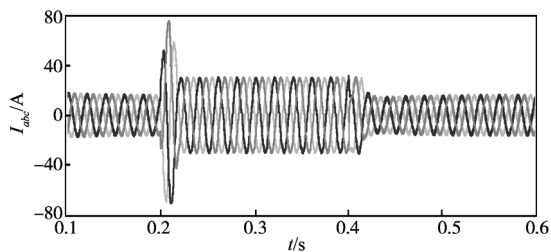


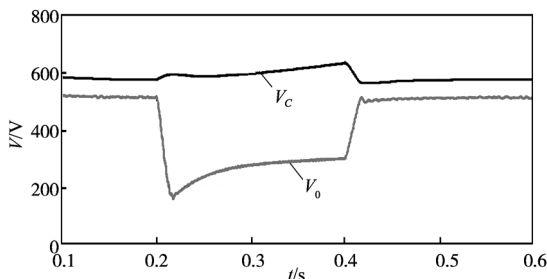
图8 电网电压仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of the power grid voltage

图9为电网电压出现三相电压对称跌落时,未采取低电压控制策略时各处的仿真波形。



a) 网侧三相电流



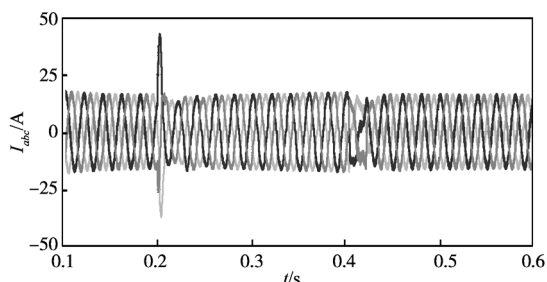
b) Z源电容电压和不控整流输出电压

图9 电网电压跌落时的各仿真波形

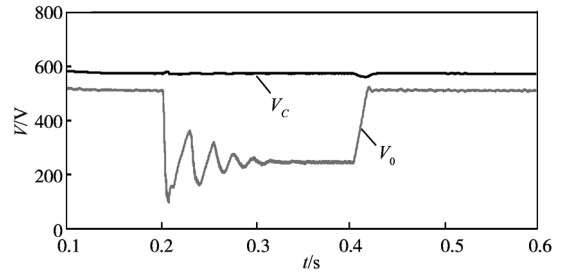
Fig. 9 Waveforms of system with the power grid voltage drop

由图9可知,传统控制策略下,由于发电机的响应速度无法跟上电网电压的变化速度,导致不平衡的功率流向Z源网络电容,使其电压迅速上升。

图10为在采用本文所提出控制策略下的各仿真波形。



a) 网侧三相电流



b) LVRT控制Z源电容电压和不控整流输出电压

图10 LVRT控制时的各仿真波形

Fig. 10 Waveforms of system under LVRT control

由图10所示仿真波形可知,当系统检测到电网电压跌落时,耗能电路开始启动,吸收不平衡的功率,根据公式(9)计算得耗能电阻的取值为 $0.47\ \Omega$ 。从图10a可以看出,并网电流响应速度较快,且正弦性良好,故障时被限制在17A;故障时Z源网络电容电压并未发生泵升,而是稳定在573V。通过crowbar电路实现了机侧功率和网侧功率的平衡。

上述仿真结果表明,将crowbar电路连接在Z源网络输入端,可快速吸收机侧功率和网侧功率之差,使Z源网络电容电压维持稳定,实现了电网电压对称跌落下的不脱网运行。

6 结语

本文分析了Z源并网风力发电系统的数学模型,采用Z源电容电压外环和电流内环的双闭环控制,将直通占空比的控制融入调制策略中,实现了Z源网络电容电压的稳定和单位功率因数并网。随后,分析了电网电压对称跌落时,机侧变流器和并网逆变器的功率差,提出一种基于Z源逆变器永磁直驱风力发电系统低电压穿越控制策略,使得crowbar电路消耗的能量匹配发电机输出能量和Z源逆变器并网能量之差。仿真结果表明,本文所提出的方法成功抑制了Z源网络电容电压的泵升和逆变桥臂的过电流,保证了风电系统在故障下的不脱网运行。

参考文献:

[1] 宋卓彦,王锡凡,滕予非,等.变速恒频风力发电机组控制技术综述[J].电力系统自动化,2010,34(10):8-17.
SONG Zhuoyan, WANG Xifan, TENG Yufei, et al. Overview of Control Technologies for Variable-Speed Constant-Frequency Wind Turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 8-17.

[2] 李建林,高志刚,胡书举,等.并联背靠背PWM变

- 流器在直驱型风力发电系统的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 59-62.
- LI Jianlin, GAO Zhigang, HU Shuju, et al. Application of Parallel Back-to-Back PWM Converter on the Direct-Drive Wind Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 59-62.
- [3] BAROUDI J A, DINAHAHI V, KNIGHT A M. A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators[C]//IEEE International Conference on Electric Machines and Drives. San Antonio: IEEE, 2005: 458-465.
- [4] TAN K, ISLAM S. Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 392-399.
- [5] PENG F Z. Z-Source Inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 504-510.
- [6] SIWAKOTI Y P, PENG F Z, BLAABJERG F, et al. Impedance-Source Networks for Electric Power Conversion Part I: A Topological Review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 699-716.
- [7] PENG F Z, YUAN X, FANG X, et al. Z-Source Inverter for Adjustable Speed Drives[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2003, 1(2): 33-35.
- [8] 李 杰, 屈克庆, 李战伟. 三相 Z 源并网逆变器的换相过程分析[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(6): 30-35.
- LI Jie, QU Keqing, LI Zhanwei. Commutation Analysis of Three-Phase Z-Source Inverter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(6): 30-35.
- [9] 许 颇, 张 兴, 张崇巍, 等. 采用 Z 源变换器的小型风力并网逆变系统[J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 93-97.
- XU Po, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei, et al. Small Wind Turbine Grid-Connected Systems Based on Z-Source Inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(4): 93-97.
- [10] 李 杰, 屈克庆, 张仁杰. 应用三相 Z 源逆变器的 PMSG 风力发电系统 MPPT 方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 67-71.
- LI Jie, QU Keqing, ZHANG Renjie. Method of MPPT for PMSG Wind Generation System Based on Three-Phase Z-Source Inverter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(6): 67-71.
- [11] 李 杰, 王得利, 陈国呈, 等. 直驱式风力发电系统的三相 Z 源并网逆变器建模与控制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 114-120.
- LI Jie, WANG Deli, CHEN Guocheng, et al. Modeling and Control of Three-Phase Z-Source Inverter for Direct-Drive Wind Generation System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 114-120.
- [12] 张华强, 李惟卫, 刁 文. 风力发电用三相 Z 源逆变器并网仿真研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(4): 31-35.
- ZHANG Huaqiang, LI Weiwei, DIAO Wen. Study on Simulation of Three-Phase Z-Source Inverter for Grid-Connected Wind Power Generation[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(4): 31-35.
- [13] 肖 磊. 直驱型永磁风力发电系统低电压穿越技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- XIAO Lei. Research on the Low Voltage Ride Through Capability of Directly of Directly-Driven PM Wind Generation System[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [14] QU Keqing, ZHOU Hao, XING Yuehong, et al. A LVRT Method for Wind Power PMSG System with Z-Source Inverter[C]//2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference. Wuhan: IEEE, 2009: 146-149.

(责任编辑: 廖友媛)