

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H02P 9/00 (2006.01)

H02P 9/10 (2006.01)

H02J 3/38 (2006.01)



# [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200810232909.4

[43] 公开日 2009年3月11日

[11] 公开号 CN 101383580A

[22] 申请日 2008.10.22

[21] 申请号 200810232909.4

[71] 申请人 重庆大学

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙正街174号

[72] 发明人 姚 骏 向大为 廖 勇 刘 刃

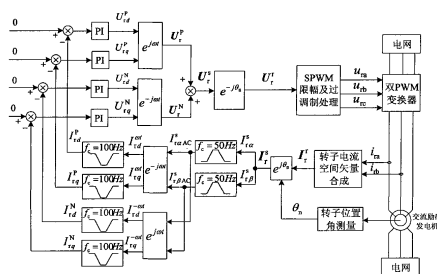
权利要求书1页 说明书6页 附图9页

## [54] 发明名称

电网短路故障时的双馈感应风力发电机低电压穿越控制方法

## [57] 摘要

一种电网短路故障时的双馈感应风力发电机低电压穿越控制方法，其特征在于，该方法通过在电网故障时限制转子转差频率电流和转子(2-s)倍额定频率电流，分别形成转子励磁电压正序控制信号和转子励磁电压负序控制信号；同时利用发电机定子电阻实现定子磁场暂态直流分量的衰减，减小定子磁场暂态分量、正序分量和负序分量对转子侧的影响。本发明提供的控制方法，无需增加任何硬件保护装置，在电网对称和非对称故障情况下，均可有效抑制转子出现过电流，保护发电机和转子励磁变频器安全运行；在电网故障过程中，可有效减小发电机对电网和机械系统的暂态冲击，故障切除后发电机可迅速恢复正常运行，实现对电网的及时支持。



1、一种电网短路故障时的双馈感应风力发电机低电压穿越控制方法，其特征在于，该控制方法依次包含以下步骤：

(a)、通过检测转子电流以及转子位置角得到定子轴系下的转子电流合成空间矢量；

(b)、将定子轴系下的转子电流合成空间矢量分解为  $\alpha$  轴转子电流分量和  $\beta$  轴转子电流分量，这两个分量分别经过截止频率为 50 Hz 的带通滤波器后得到  $\alpha$  轴转子电流交流分量和  $\beta$  轴转子电流交流分量；

(c)、 $\alpha$  轴转子电流交流分量和  $\beta$  轴转子电流交流分量经正向旋转坐标变换后得到正向旋转坐标系下的转子电流 d 轴分量和 q 轴分量，这两个分量分别经截止频率为 100 Hz 的陷波滤波器后得到转子正序电流 d 轴分量和 q 轴分量； $\alpha$  轴转子电流交流分量和  $\beta$  轴转子电流交流分量经反向旋转坐标变换后得到反向旋转坐标系下的转子电流 d 轴分量和 q 轴分量，这两个分量分别经截止频率为 100 Hz 的陷波滤波器后得到转子负序电流 d 轴分量和 q 轴分量；

(d)、将转子正序电流 d 轴分量和 q 轴分量以及转子负序电流 d 轴分量和 q 轴分量的设定值均设定为 0，通过对这四个量进行 PI 调节后可得到转子正序控制电压 d 轴分量和 q 轴分量以及转子负序控制电压 d 轴分量和 q 轴分量；

(e)、将转子正序控制电压矢量和转子负序控制电压矢量合成后得到定子轴系下的转子控制电压矢量，将其进行坐标旋转变换后得到转子轴系下的转子控制电压矢量，对该电压矢量进行限幅及过调制处理后可得到三相转子控制电压信号实现对转子侧变换器的控制。

## 电网短路故障时的双馈感应风力发电机低电压穿越控制方法

### 技术领域

本发明涉及双馈感应风力发电机运行控制领域，特别是涉及一种电网短路故障时的双馈感应风力发电机低电压穿越控制方法。

### 背景技术

双馈感应发电机以其先进灵活的运行特点在大型变速恒频风力发电机组中得到广泛研究和应用。随着越来越多的双馈感应风力发电机组接入电网运行，电网对并网运行的双馈感应发电机要求也越来越高。从电力系统稳定运行的角度出发，系统要求发电机组在电网故障时仍能与系统保持连接，并在故障切除后尽快恢复机端电压，维持系统稳定运行，即要求电网故障时双馈感应风电机组应具备低电压穿越能力。

目前 MW 级以上商用双馈感应风力发电机组主要采用转子短路保护技术 (Crowbar Protection) 实现电网故障期间发电机不间断运行。该技术在电网故障时切除发电机励磁电源，利用转子旁路保护电阻释放能量以减小转子过电流，保护转子励磁回路的大功率器件，维持发电机不脱网运行。

现有技术中的“Crowbar Protection”控制方法，目前还存在以下不足：①需要增加新的硬件保护装置，从而增加了系统成本和控制难度；②在电网故障时发电机作感应电机运行，机组将从电网吸收大量的无功功率，这对电网电压稳定性不利；③故障过程中发电机对电网的暂态电磁冲击和对风力机的机械冲击均较严重。

### 发明内容

本发明的目的是提供一种电网短路故障时的双馈感应风力发电机低电压穿越控制方法。该控制方法无需增加任何硬件保护装置，系统实现简单，可靠性高；在电网对称和非对称故障情况下均可有效抑制转子出现过电流，保护发电机和转子励磁变频器安全运行；在电网故障过程中可有效减小发电机对电网和机械系统的暂态冲击，故障切除后发电机可迅速恢复正常运行，实现对电网的及时支持。

本发明的目的可以通过以下技术方案来加以实现。

(a)、通过检测转子电流以及转子位置角得到定子轴系下的转子电流合成空

间矢量；

(b)、将定子轴系下的转子电流合成空间矢量分解为  $\alpha$  轴转子电流分量和  $\beta$  轴转子电流分量，这两个分量分别经过截止频率为 50 Hz 的带通滤波器后得到  $\alpha$  轴转子电流交流分量和  $\beta$  轴转子电流交流分量；

(c)、 $\alpha$  轴转子电流交流分量和  $\beta$  轴转子电流交流分量经正向旋转坐标变换后得到正向旋转坐标系下的转子电流 d 轴分量和 q 轴分量，这两个分量分别经截止频率为 100 Hz 的陷波滤波器后得到转子正序电流 d 轴分量和 q 轴分量； $\alpha$  轴转子电流交流分量和  $\beta$  轴转子电流交流分量经反向旋转坐标变换后得到反向旋转坐标系下的转子电流 d 轴分量和 q 轴分量，这两个分量分别经截止频率为 100 Hz 的陷波滤波器后得到转子负序电流 d 轴分量和 q 轴分量；

(d)、将转子正序电流 d 轴分量和 q 轴分量以及转子负序电流 d 轴分量和 q 轴分量的设定值均设定为 0，通过对这四个量进行 PI 调节后可得到转子正序控制电压 d 轴分量和 q 轴分量以及转子负序控制电压 d 轴分量和 q 轴分量；

(e)、将转子正序控制电压矢量和转子负序控制电压矢量合成后得到定子轴系下的转子控制电压矢量，将其进行坐标旋转变换后得到转子轴系下的转子控制电压矢量，对该电压矢量进行限幅及过调制处理后可得到三相转子控制电压信号实现对转子侧变换器的控制。

### 附图说明

图 1 为电网短路故障时的双馈感应发电机低电压穿越控制框图。

图 2 为电网对称故障下采用“Crowbar Protection”方法的双馈感应风力发电机的有功功率、定子电压、转子电压和电磁转矩的运行效果图。

图 3 为电网对称故障下采用“Crowbar Protection”方法的双馈感应风力发电机的无功功率、定子电流、转子电流和转速的运行效果图。

图 4 为电网对称故障下采用本发明方法的双馈感应风力发电机的有功功率、定子电压、转子电压和电磁转矩的运行效果图。

图 5 为电网对称故障下采用本发明方法的双馈感应风力发电机的无功功率、定子电流、转子电流和转速的运行效果图。

图 6 为电网两相对地短路故障下采用“Crowbar Protection”方法的双馈感应风力发电机的有功功率、定子电压、转子电压和电磁转矩的运行效果图。

图 7 为电网两相对地短路故障下采用“Crowbar Protection”方法的双馈感应风力发电机的无功功率、定子电流、转子电流和转速的运行效果图。

图 8 为电网两相对地短路故障下采用本发明方法的双馈感应风力发电机的有功功率、定子电压、转子电压和电磁转矩的运行效果图。

图 9 为电网两相对地短路故障下采用本发明方法的双馈感应风力发电机的无功功率、定子电流、转子电流和转速的运行效果图。

图 10 为电网单相对地短路故障下采用“Crowbar Protection”方法的双馈感应风力发电机的有功功率、定子电压、转子电压和电磁转矩的运行效果图。

图 11 为电网单相对地短路故障下采用“Crowbar Protection”方法的双馈感应风力发电机的无功功率、定子电流、转子电流和转速的运行效果图。

图 12 为电网单相对地短路故障下采用本发明方法的双馈感应风力发电机的有功功率、定子电压、转子电压和电磁转矩的运行效果图。

图 13 为电网单相对地短路故障下采用本发明方法的双馈感应风力发电机的无功功率、定子电流、转子电流和转速的运行效果图。

图 14 为电网相间短路故障下采用“Crowbar Protection”方法的双馈感应风力发电机的有功功率、定子电压、转子电压和电磁转矩的运行效果图。

图 15 为电网相间短路故障下采用“Crowbar Protection”方法的双馈感应风力发电机的无功功率、定子电流、转子电流和转速的运行效果图。

图 16 为电网相间短路故障下采用本发明方法的双馈感应风力发电机的有功功率、定子电压、转子电压和电磁转矩的运行效果图。

图 17 为电网相间短路故障下采用本发明方法的双馈感应风力发电机的无功功率、定子电流、转子电流和转速的运行效果图。

## 具体实施方式

以下结合附图对本发明的具体实施方案作进一步描述。

在本发明中，通过检测转子电流合成得到转子轴系下的转子电流合成空间矢量为

$$I_r^r = \sqrt{\frac{2}{3}}(i_{ra} + i_{rb}e^{j120^\circ} + i_{rc}e^{j240^\circ}) = I_r e^{j\theta_r}$$

其中， $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$  分别为转子三相瞬时电流， $I_r$  为转子电流空间矢量的幅值， $\theta_r$  为转子电流空间矢量在转子轴系下的位置角。

转子电流空间矢量与检测到的转子位置角  $\theta_n$  进行旋转变换后可得到定子轴

系下的转子电流合成空间矢量  $I_r^s$ ，将其进行分解可得到转子电流在定子静止  $\alpha$ 、 $\beta$  轴系下的分量  $I_{r\alpha}^s$  和  $I_{r\beta}^s$ ，即

$$I_r^s = I_r^r e^{j\theta_n} = I_{r\alpha}^s + jI_{r\beta}^s$$

$I_{r\alpha}^s$  和  $I_{r\beta}^s$  中含有直流分量、正序和负序分量，利用截止频率为 50 Hz 的带通滤波器后可以滤除转子电流中的直流分量和高次谐波分量，其输出仅剩下含有正序和负序分量的转子电流  $\alpha$  轴交流分量和  $\beta$  轴交流分量： $I_{r\alpha AC}^s$  和  $I_{r\beta AC}^s$ ，这时的转子电流空间矢量可表示为

$$I_{rAC}^s = I_{r\alpha AC}^s + jI_{r\beta AC}^s$$

式中， $I_{rAC}^s$  表示去掉直流分量后的转子电流空间矢量。

对  $\alpha$  轴转子电流交流分量  $I_{r\alpha AC}^s$  和  $\beta$  轴转子电流交流分量  $I_{r\beta AC}^s$  经正向旋转坐标变换后得到正向旋转坐标系下的转子电流 d 轴分量  $I_{rd}^{o\omega}$  和 q 轴分量  $I_{rq}^{o\omega}$ ，这两个分量分别经截止频率为 100 Hz 的陷波滤波器后得到转子正序电流 d 轴分量  $I_{rd}^p$  和 q 轴分量  $I_{rq}^p$ ； $\alpha$  轴转子电流交流分量  $I_{r\alpha AC}^s$  和  $\beta$  轴转子电流交流分量  $I_{r\beta AC}^s$  经反向旋转坐标变换后得到反向旋转坐标系下的转子电流 d 轴分量  $I_{rd}^{-o\omega}$  和 q 轴分量  $I_{rq}^{-o\omega}$ ，这两个分量分别经截止频率为 100 Hz 的陷波滤波器后得到转子负序电流 d 轴分量  $I_{rd}^N$  和 q 轴分量  $I_{rq}^N$ 。

将转子正序电流 d 轴分量和 q 轴分量以及转子负序电流 d 轴分量和 q 轴分量的设定值均设定为 0，通过对四个直流电流分量  $I_{rd}^p$ 、 $I_{rq}^p$ 、 $I_{rd}^N$  和  $I_{rq}^N$  分别进行 PI 调节后可得到转子正序控制电压 d 轴分量  $U_{rd}^p$  和 q 轴分量  $U_{rq}^p$  以及转子负序控制电压 d 轴分量  $U_{rd}^N$  和 q 轴分量  $U_{rq}^N$ ，这四个控制分量分别合成后得到转子电压正序控制信号  $U_r^p$  和负序控制信号  $U_r^N$ ，将转子正序控制电压矢量  $U_r^p$  和转子负序控制电压矢量  $U_r^N$  合成后得到定子轴系下的转子控制电压矢量  $U_r^s$ ，将其进行坐标旋转变换后得到转子轴系下的转子控制电压矢量  $U_r^r$ ，对该电压矢量进行限幅及过调制处理后可得到三相转子控制电压信号实现对转子侧变换器的控制。

采用“Crowbar Protection”方法时，得到的对称短路故障情况下发电机运行效果如附图 2、附图 3 所示。当电网故障发生后发电机的电磁转矩峰值达到 2.22pu，发电机定子方输出较大的有功功率，发电机产生较大的定子电流（最大值为 3.09pu）和转子电流（最大值为 3.21pu），这将极易损坏励磁电源的功率器件；当故障切除，定子电压恢复后，发电机作感应发电机运行，从系统吸收大量无功励磁，同时产生较大的定、转子电流和有功功率。而采用本发明方法时，得到的对称短路故障情况下发电机运行效果如附图 4、附图 5 所示。电网故障发生

后发电机的电磁转矩峰值为 1.52pu，定子有功功率输出迅速减小，无功功率有一定波动而随即恢复至零左右。定子电流最大值为 1.93pu，转子电流最大值为 1.94pu，其被有效地限制在 2 倍额定峰值电流以内；当故障切除后，定子电压重新恢复至额定值，发电机定子电流和转子电流均被限制在安全范围之内。发电机有功和无功功率经过一定波动后逐步达到稳定，发电机从电网吸收的无功功率较小且能提供一定的有功功率支持。当故障励磁控制过程结束后，发电机重新以功率因数 1 输出额定有功和电磁转矩，为故障后电网的稳定运行提供必要支持。

采用“Crowbar Protection”方法时，得到的电网两相对地短路情况下发电机运行效果如附图 6、附图 7 所示。当电网故障发生后转子电流峰值超过电流限制值，达到 3.43pu，电磁转矩波动很大，有功和无功功率波动较大且在故障切除后发电机从系统吸收大量无功励磁。而采用本发明方法时，得到的电网两相对地短路情况下发电机运行效果如附图 8、附图 9 所示。当电网故障发生后定子电流中的工频交流正序和负序分量都得到有效限制，转子电流峰值为 1.94pu，被成功地控制在 2 倍额定峰值电流以内。发电机电磁转矩波动较小，在故障切除后仅从系统吸收少量无功，对系统的暂态电磁冲击和对风力机的机械冲击均较小。

采用“Crowbar Protection”方法时，得到的电网单相对地短路故障情况下发电机运行效果如附图 10、附图 11 所示。而采用本发明方法时，得到的电网单相对地短路故障情况下发电机运行效果如附图 12、附图 13 所示。采用“Crowbar Protection”方法时，得到的电网相间短路故障情况下发电机运行效果如附图 14、附图 15 所示。而采用本发明方法时，得到的电网相间短路故障情况下发电机运行效果如附图 16、附图 17 所示。与电网两相对地短路故障情况类似，采用“Crowbar Protection”方法时，转子电流峰值超过电流限制值，电磁转矩波动很大，有功和无功功率波动较大且在故障切除后发电机从系统吸收大量无功励磁。而采用本发明方法时，转子电流峰值被成功地控制在 2 倍额定峰值电流以内。发电机电磁转矩波动较小，发电机对系统的暂态电磁冲击和对风力机的机械冲击均较小。

本发明提供的控制方法，适用于电网各种类型的短路故障，当发电机定子电压严重骤降时均能有效限制定子电流工频分量，抑制转子出现过电流，有效地保护了转子励磁变频器，使得发电机能够实现低电压穿越运行；同传统方法相比，电网故障过程中采用本发明方法的发电机对电网和机械系统的暂态冲击

---

均被控制到较低限度，发电机从系统吸收少量无功并能够在故障切除后迅速恢复正常运行，实现对电网的及时支持。



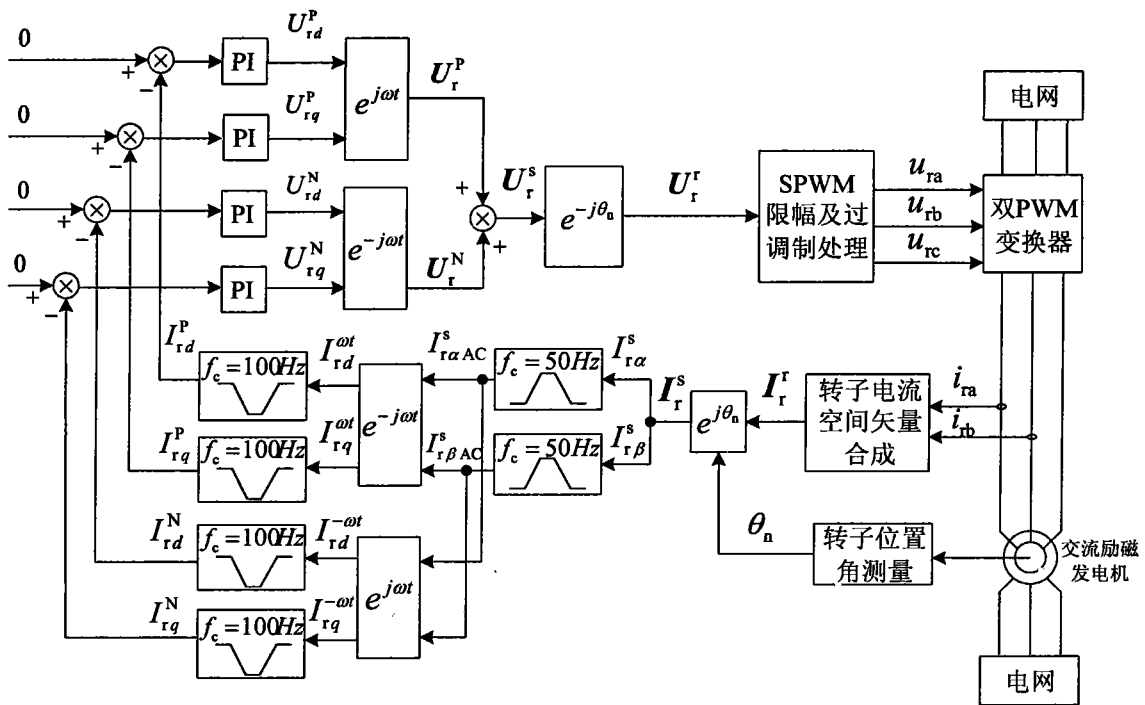


图 1

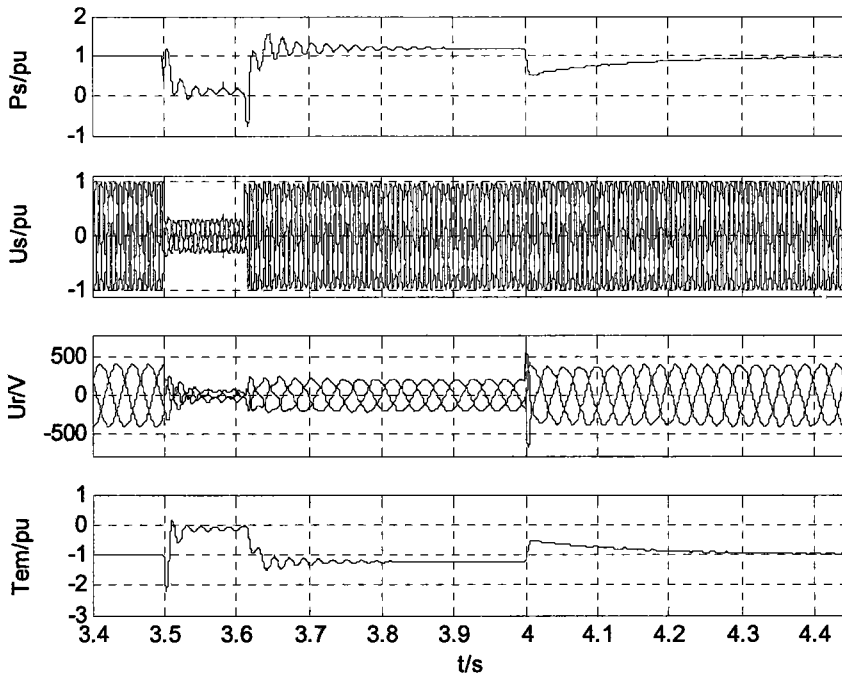


图 2

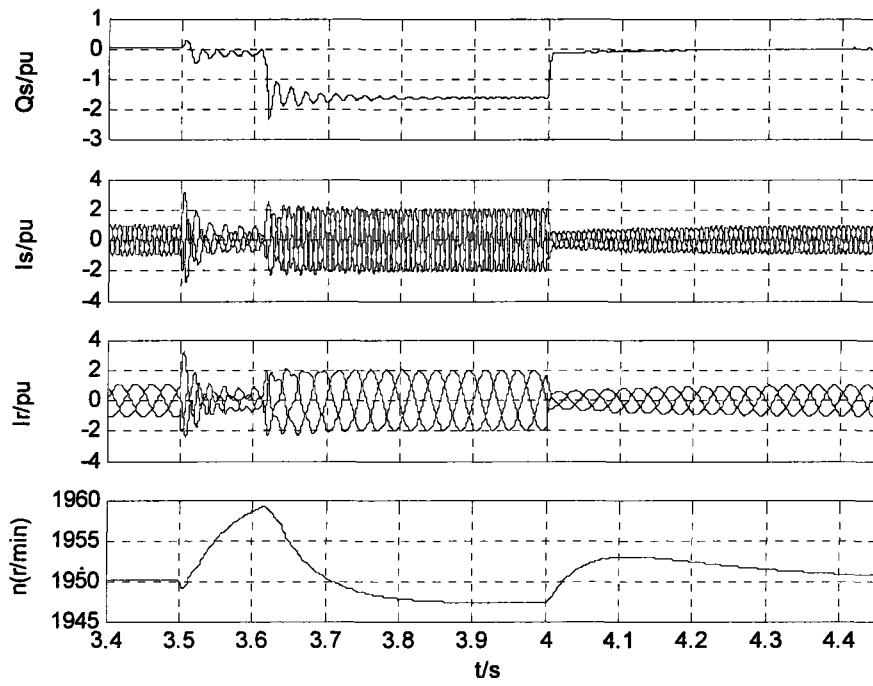


图 3

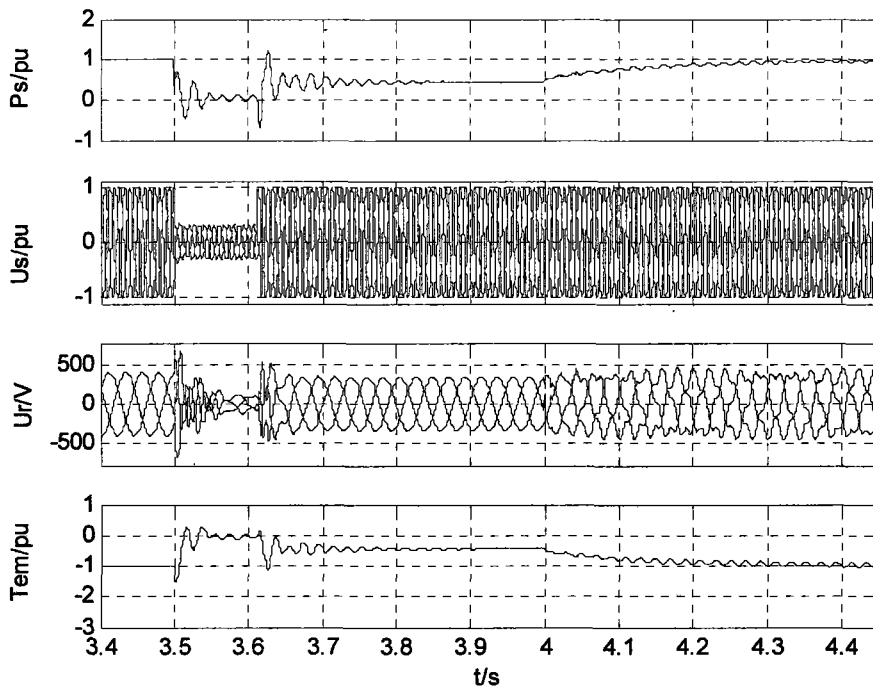


图 4

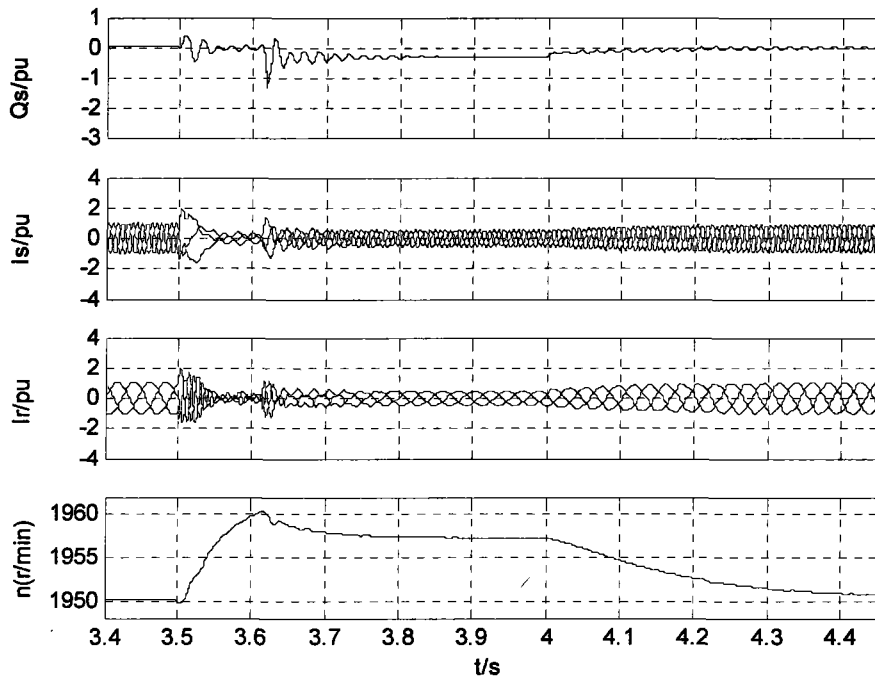


图 5

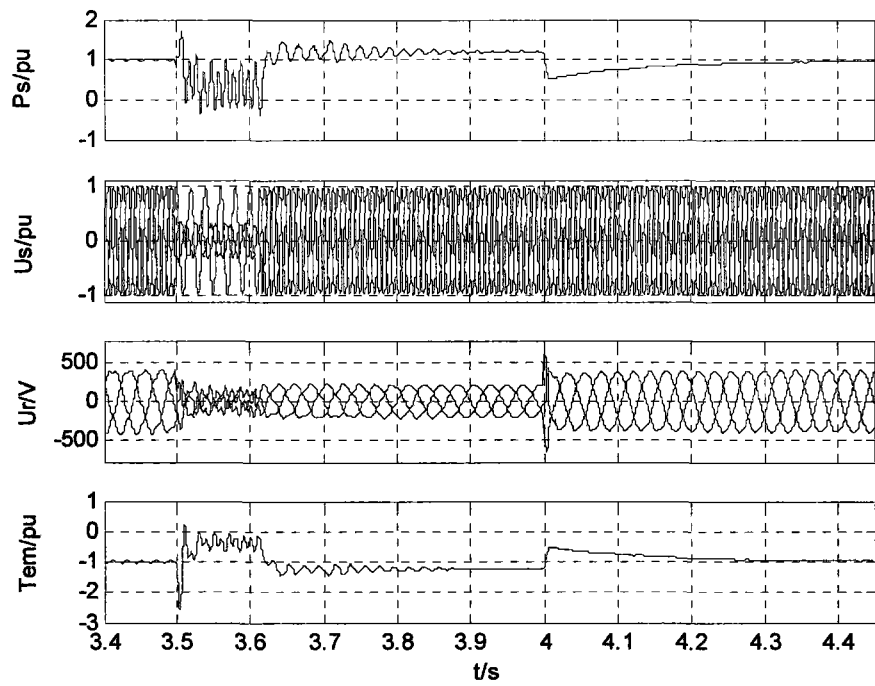


图 6

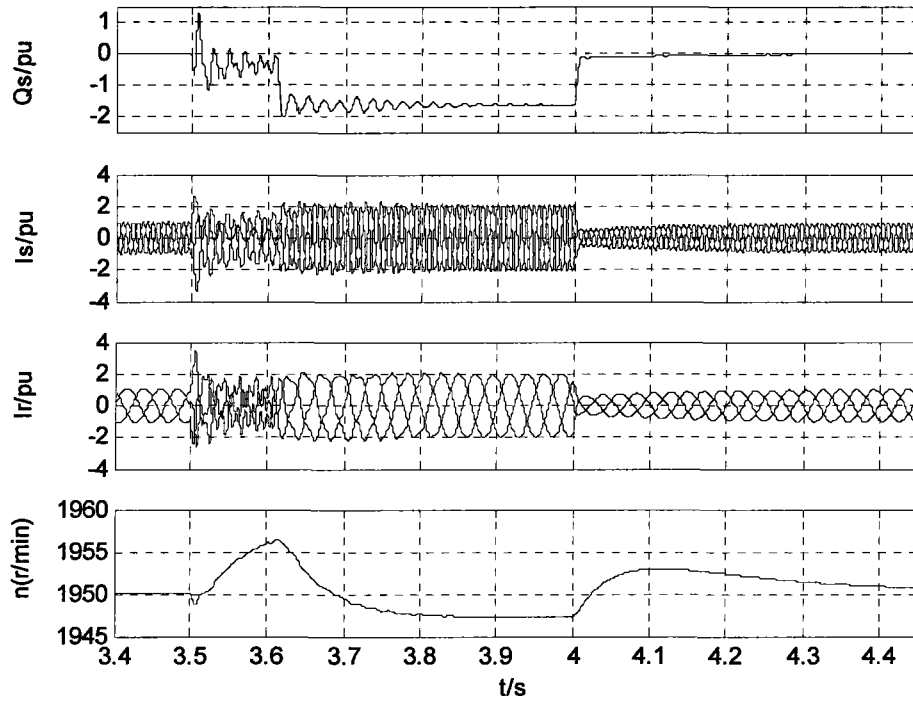


图 7

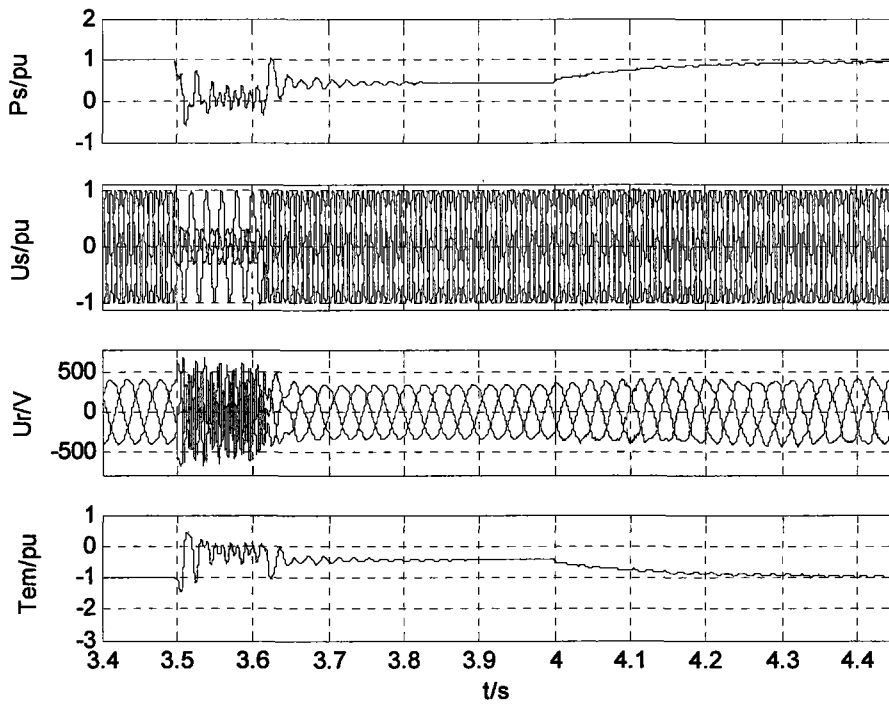


图 8

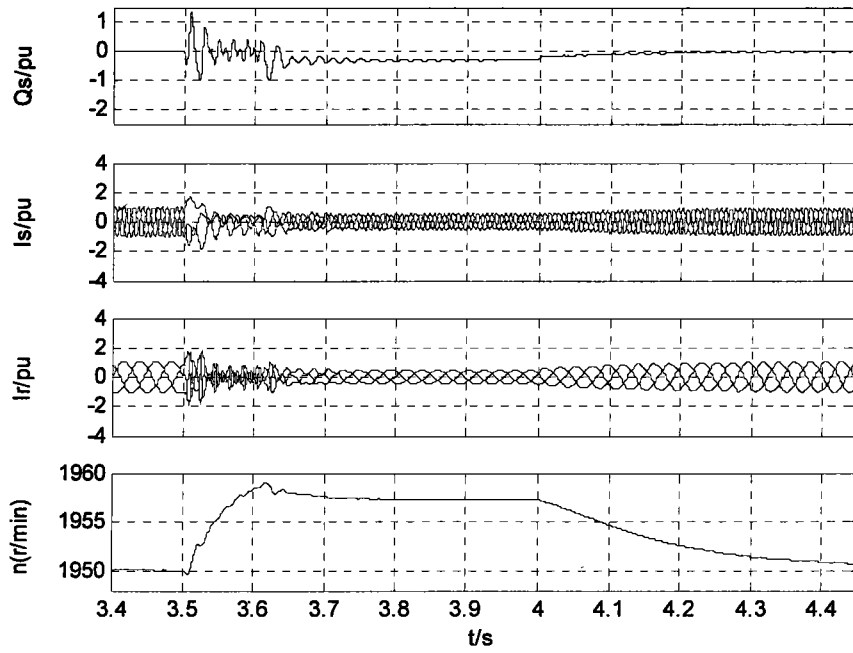


图 9

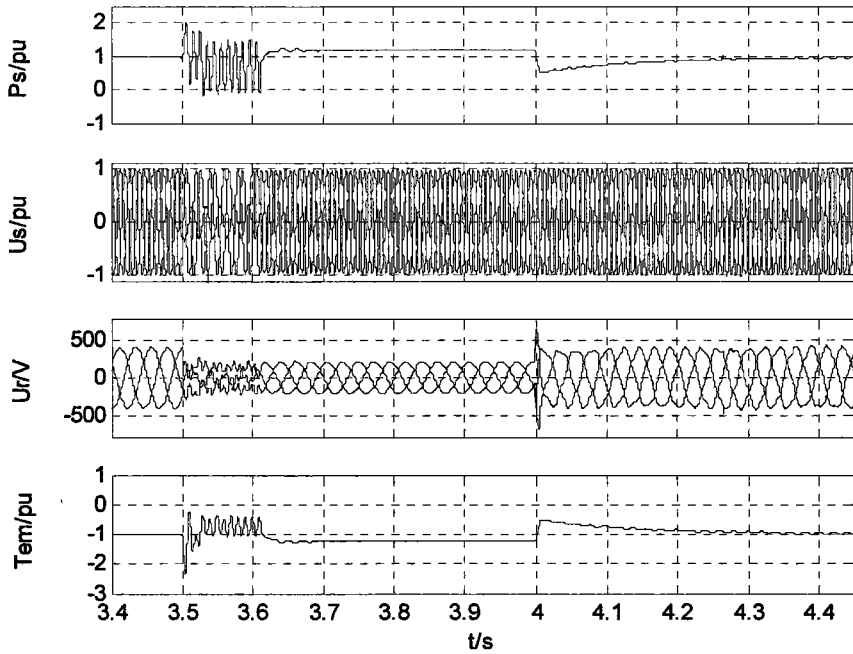


图 10

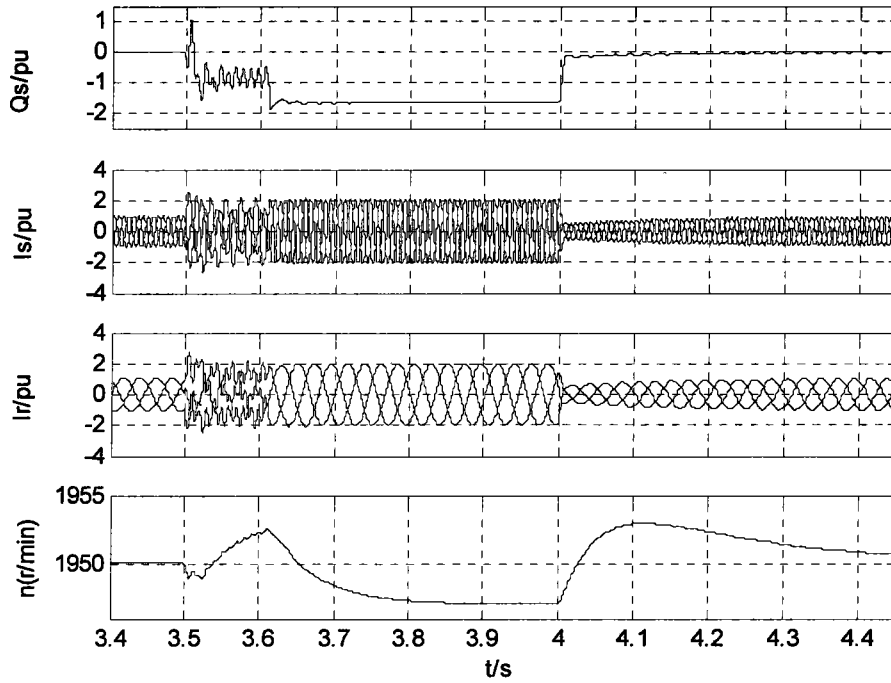


图 11

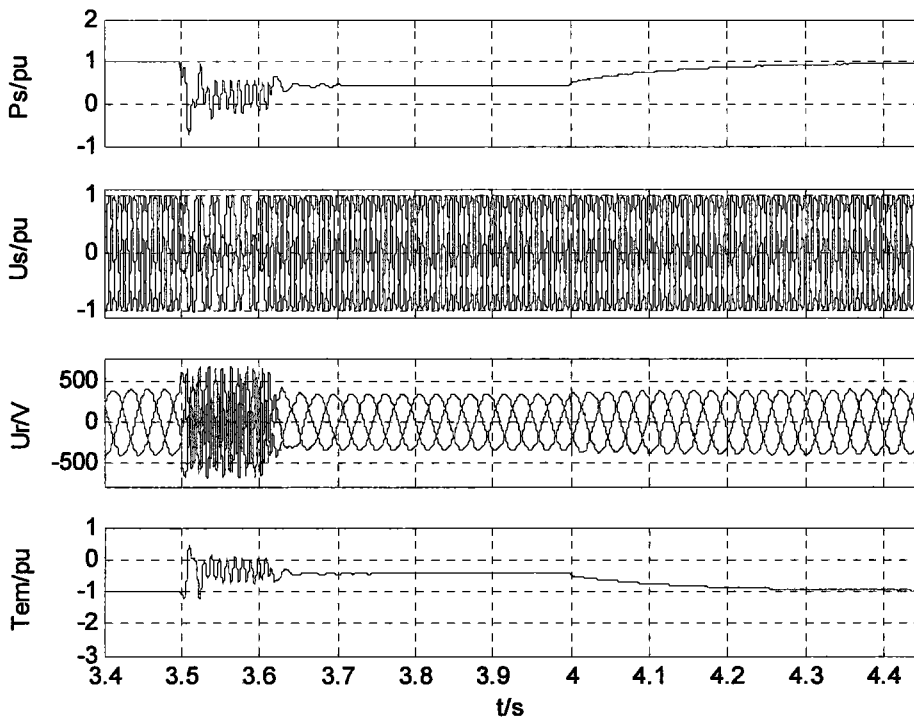


图 12

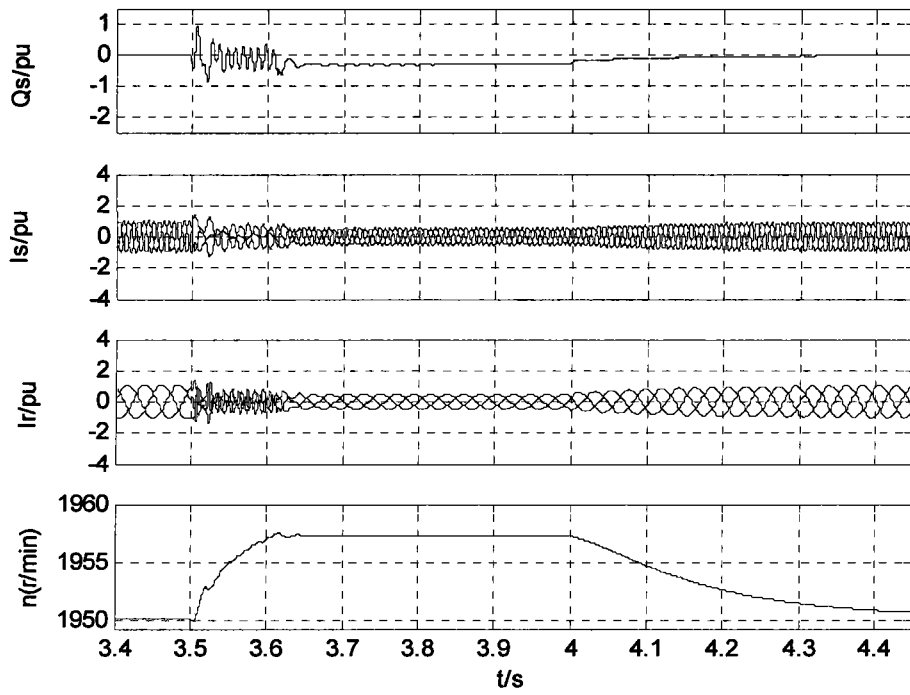


图 13

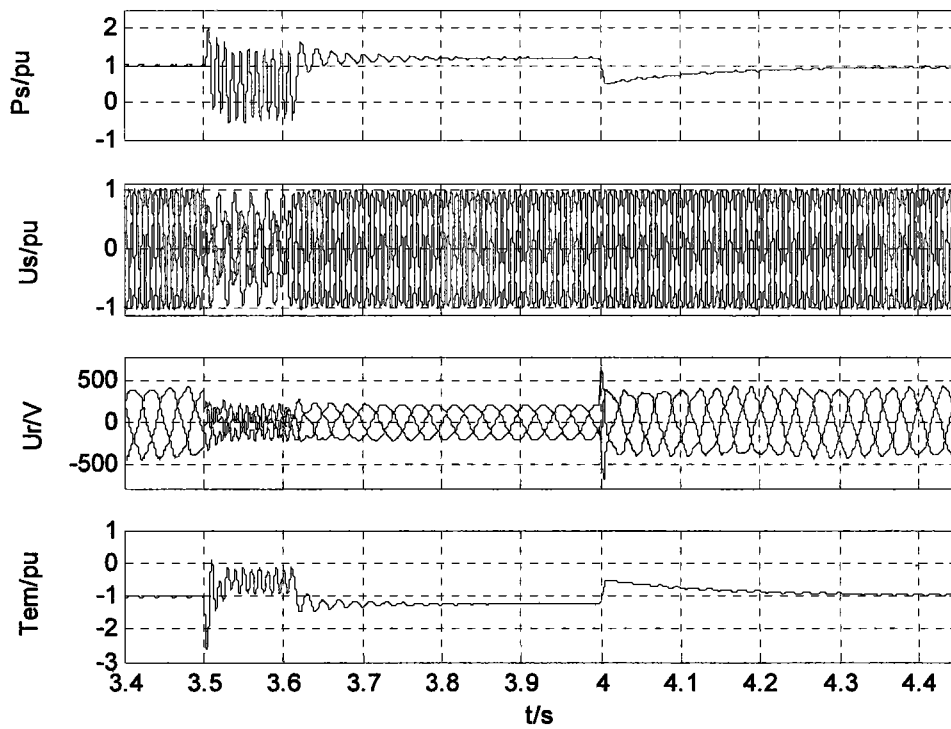


图 14

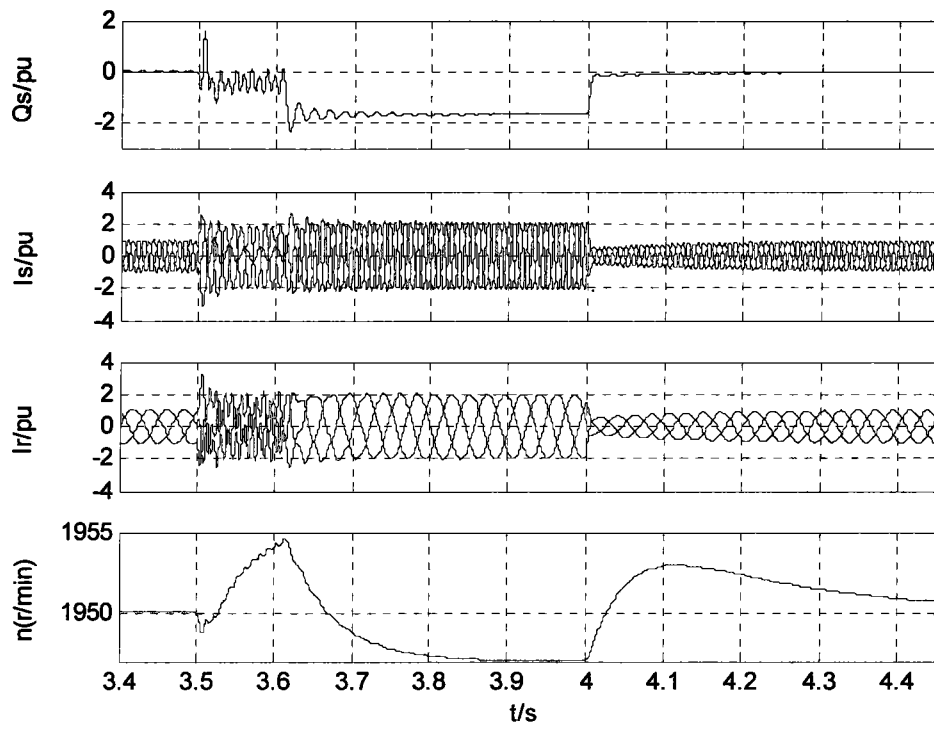


图 15

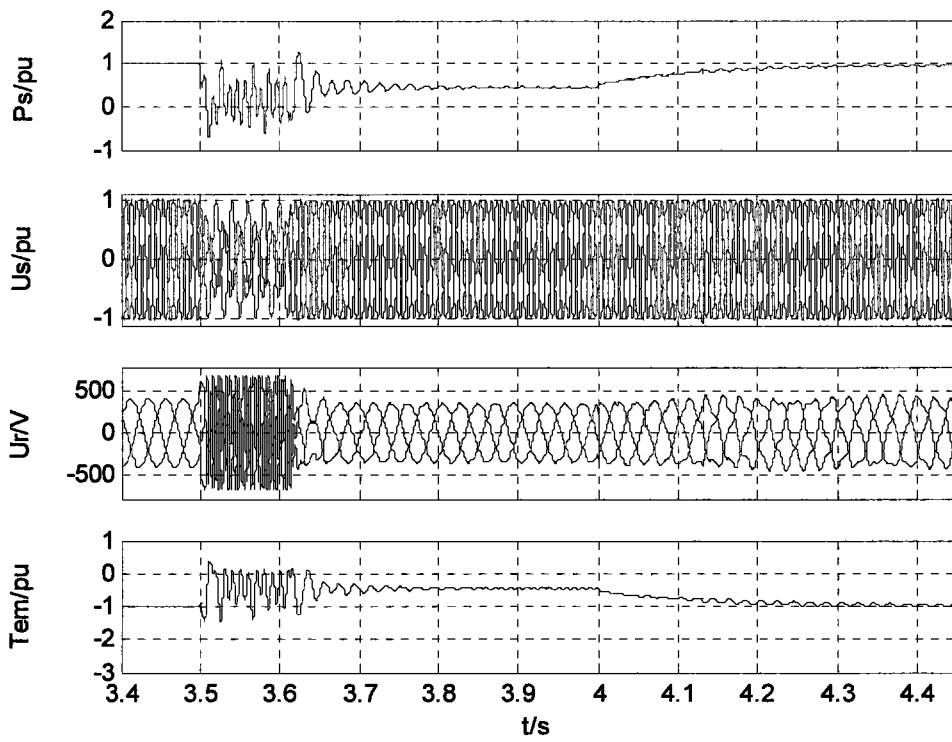


图 16



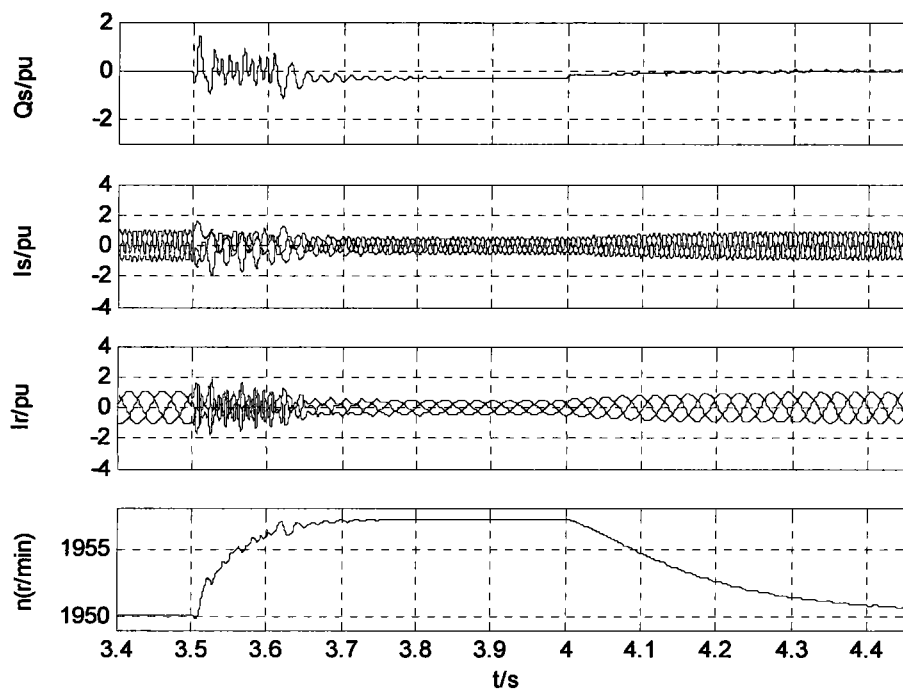


图 17