



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104300556 A

(43) 申请公布日 2015. 01. 21

(21) 申请号 201410542918. 9

(22) 申请日 2014. 10. 15

(71) 申请人 四川东方电气自动控制工程有限公司

地址 618099 四川省德阳市庐山南路三段 18 号

(72) 发明人 徐其惠 苏昭晖 曹贝贞 王波  
刘江 辛旺 王昌垒 闵泽生  
陈建国 蒋驰雷 李莉

(74) 专利代理机构 成都天嘉专利事务所(普通合伙) 51211

代理人 徐进

(51) Int. Cl.

H02J 3/24(2006. 01)

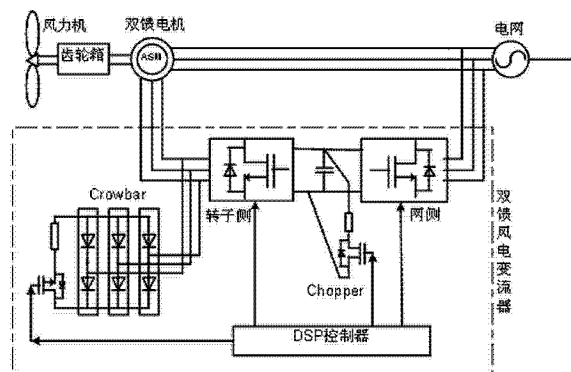
权利要求书1页 说明书4页 附图5页

(54) 发明名称

一种双馈风力发电系统的电网低频振荡适应方法

(57) 摘要

本发明公开了一种双馈风电机组电网低频振荡适应方法,对常规风电变流器控制系统进行重新建模,得到定子磁链变化时的双馈风电变流器控制模型,并使用该模型进行风电变流器控制,达到双馈风电机组电网低频振荡时连续运行而不脱网的目的,对于部分特殊电网的稳定有着非常重大的作用。



1. 一种双馈风力发电系统的电网低频振荡适应方法,其特征在于:

电网出现低频振荡时,对常规风电变流器控制系统进行重新建模,得到定子磁链变化时的双馈风电变流器控制模型。

2. 根据权利要求1所述的一种双馈风力发电系统的电网低频振荡适应方法,其特征在于,所述控制模型的推导步骤如下:

a、基于定子电压定向的双馈感应发电机控制模型,正方向均按照电动机惯例选取,转子量均折算到定子侧,设  $d$ - $q$  坐标系以同步速度旋转且  $q$  轴超前于  $d$  轴,则电机电压和磁链方程为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_s \psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $R_s$ 、 $R_r$  为定、转子绕组等效电阻;  $L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_m$  为定、转子绕组自感及互感;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$  为  $d$ 、 $q$  轴定、转子电压;  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 、 $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  为  $d$ 、 $q$  轴定、转子电流;  $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ 、 $\psi_{rd}$ 、 $\psi_{rq}$  为  $d$ 、 $q$  轴定、转子磁链;  $\omega_1$ 、 $\omega_s$  为同步角速度和转差角速度;  $p$  为微分算子;

b、采用发电机定子电压定向控制,将定子电压综合矢量定向在  $d$  轴上,则有:

$$\begin{cases} u_{sd} = U_s \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $U_s$  表示定子电压综合矢量的幅值,这时  $d$  轴的位置就是定子电压综合矢量的位置;将检测到的定子三相电压经过  $3/2$  坐标变换,得到静止两相坐标系下的定子电压  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ ,可计算出定子电压矢量的位置,由此得到  $d$  轴的位置  $\theta_1$ ;

c、将电流传感器检测到的定子电流和转子电流经过坐标变换,得到旋转坐标系下的  $dq$  轴分量,通过式(2)计算可得定子磁链  $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ ;

d、忽略电机定子电阻,结合式(1)、(2)、(3),考虑发电机定子磁链变化,推导出双馈风电变流器转子侧的控制电压方程如下:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rd}}{dt} - (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_1 i_{rq} + \frac{L_m}{L_r} U_s + \frac{L_m \omega_1}{L_r} \psi_{sq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rq}}{dt} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_1 i_{rd} + \frac{L_m}{L_r} U_s - \frac{L_m \omega_1}{L_r} \psi_{sd} \end{cases} \quad (4)$$

e、在双馈风电变流器转子侧最大输出控制电压下,将 d 步骤得到的控制电压加入到双馈风电变流器,通过双馈风电变流器 PWM 调制的方式输出控制,以达到适应电网低频振荡的目的。

3. 根据权利要求1或2所述的任一种双馈风力发电系统的电网低频振荡适应方法,其特征在于:还包括 chopper 装置,所述 chopper 装置为安装在双馈风电变流器中的直流母线侧的卸荷装置,在母线电压过高时通过直流侧 chopper 装置进行卸荷。

## 一种双馈风力发电系统的电网低频振荡适应方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及到兆瓦级风力发电变流器在低频振荡特殊电网下的运行和控制,保证风力发电机组在电网低频振荡时不脱网运行,有利于特殊情况下的电力系统稳定运行。

### 发明内容

[0002] 本发明的目的在于:提供一种双馈风电机组电网低频振荡适应方法,对常规风电变流器控制系统进行重新建模,得到定子磁链变化时的双馈风电变流器控制模型,并使用该模型进行风电变流器控制,达到双馈风电机组电网低频振荡时连续运行而不脱网的目的。

[0003] 一种双馈风力发电系统的电网低频振荡适应方法,电网出现低频振荡时,对常规风电变流器控制系统进行重新建模,得到定子磁链变化时的双馈风电变流器控制模型。

[0004] 进一步的,所述控制模型的推导步骤如下:

a、基于定子电压定向的双馈感应发电机控制模型,正方向均按照电动机惯例选取,转子量均折算到定子侧,设  $d$ - $q$  坐标系以同步速度旋转且  $q$  轴超前于  $d$  轴,则电机电压和磁链方程为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_s \psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R_s$ 、 $R_r$  为定、转子绕组等效电阻; $L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_m$  为定、转子绕组自感及互感; $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$  为  $d$ 、 $q$  轴定、转子电压; $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 、 $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  为  $d$ 、 $q$  轴定、转子电流; $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ 、 $\psi_{rd}$ 、 $\psi_{rq}$  为  $d$ 、 $q$  轴定、转子磁链; $\omega_1$ 、 $\omega_s$  为同步角速度和转差角速度; $p$  为微分算子;

b、采用发电机定子电压定向控制,将定子电压综合矢量定向在  $d$  轴上,则有:

$$\begin{cases} u_{sd} = U_s \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $U_s$  表示定子电压综合矢量的幅值,这时  $d$  轴的位置就是定子电压综合矢量的位置;将检测到的定子三相电压经过  $3/2$  坐标变换,得到静止两相坐标系下的定子电压  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ ,可计算出定子电压矢量的位置,由此得到  $d$  轴的位置  $\theta_1$ ;

c、将电流传感器检测到的定子电流和转子电流经过坐标变换,得到旋转坐标系下的  $dq$  轴分量,通过式(2)计算可得定子磁链  $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ ;

d、忽略电机定子电阻,结合式(1)、(2)、(3),考虑发电机定子磁链变化,推导出双馈风

电变流器转子侧的控制电压方程如下：

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rd}}{dt} - (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_r i_{rq} + \frac{L_m}{L_r} U_{rd} + \frac{L_m \omega_r}{L_r} \psi_{rd} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rq}}{dt} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_r i_{rd} + \frac{L_m}{L_r} U_{rq} - \frac{L_m \omega_r}{L_r} \psi_{rd} \end{cases} \quad (4)$$

e、在双馈风电变流器转子侧最大输出控制电压下，将 d 步骤得到的控制电压加入到双馈风电变流器，通过双馈风电变流器 PWM 调制的方式输出控制，以达到适应电网低频振荡的目的。

[0005] 进一步的，还包括 chopper 装置，所述 chopper 装置为安装在双馈风电变流器中的直流母线侧的卸荷装置，在母线电压过高时通过直流侧 chopper 装置进行卸荷，从而避免触发母线电压保护而停机。

[0006] 本发明所产生的有益效果是：

1、采用本发明的双馈风电变流器模型进行控制，较好适应电网低频振荡，避免风机主控系统“电网相位角偏差过大”或者风电变流器系统“过流或母线过压”而脱网停机。

[0007] 2、常规风电变流器模型都是基于定子 / 电网定向（不变）建立的，不具备电网低频振荡适应能力，而本发明考虑定子磁链动态变化而重新建模，得到定子磁链动态变化的风电变流器控制模型与直流侧 chopper 装置协同控制，在变流器最大输出电压范围内尽可能适应电网低频振荡不脱网。

[0008] 3、本发明控制模型可以有效适应电网低频振荡工况外，还可以适应电网电压不平衡、电压波动、电网故障（浅幅值电网电压跌落）等特殊电网工况，而无需重新设计控制策略，具有较好的适应性。

## 附图说明

[0009] 图 1 电网低频振荡导致风电机组脱网故障数据图。

[0010] 图 2 本发明采用双馈风电变流器拓扑图。

[0011] 图 3 本发明采用双馈风电变流器转子侧控制框图。

[0012] 图 4 电网低频振荡下的双馈风电变流器控制仿真效果对比图。

[0013] 图 5 用电网低频振荡下的双馈风电变流器控制测试效果对比图。

[0014] 图 6 电网不平衡下的双馈风电变流器控制仿真效果对比图。

## 具体实施方式

[0015] 以下结合附图对本发明的一种双馈风力发电系统的电网低频振荡适应方法进行进一步描述。

[0016] 在电网产生低频振荡时，定子电压的变化将在双馈感应发电机内部引起一系列的暂态变化，其中最重要的变化就是引起发电机定子磁链发生改变，通过图 1 的电网电流可以看出电网电流低频分量远远超过了工频分量，同时通过图 1 可以看出双馈风电变流器母线电压出现剧烈波动，如果不加控制的话，必然触发双馈风电变流器定转子过流或者直流母线过压保护而脱网停机。

[0017] 如图 2，本发明为常规双馈风电变流器增加了直流侧 chopper 装置，并对双馈风电变流器控制模型考虑磁链变化进行重新建模，具体控制方式如图 3，采用该控制算法的双馈

风电变流器转子侧控制策略仿真结果如图 4 (上),通过图 4 (上)可以看出,虽然电网电压低频振荡幅值并不大,但是对于双馈电机,定子电压的变化将在双馈感应发电机内部引起一系列的暂态变化,其中最重要的变化就是引起发电机定子磁链发生改变,所以定子电流低频振荡明显,远大于全功率运行时的电流幅值,同时通过电机定转子关系,可以看出母线电压和转子电流由于电网低频振荡而畸变增大。从仿真结果不难看出,电网电压低频振荡时,双馈风电变流器很容易触发定转子过流或者直流母线过压保护而脱网停机。为了对比,采用本发明控制方法控制的仿真结果如图 4 (下),通过图 4 (下)可以看出,采用本发明控制方法控制后,转子和定子电流低频振荡分量明显得到抑制,同时直流母线电压振荡幅度也大幅减弱,在双馈风电变流器转子电压保持最大输出的情况下,通过转子控制电压来抑制电网低频振荡,从而使定转子电流恢复标准正弦,母线电压振荡减弱,从而不会触发风电机组的保护设置,保证风电机组在电网低频振荡时连续运行。为了尽可能保证双馈风电变流器在电网低频振荡时不脱网运行,在采用本发明方法控制的同时,为双馈风电变流器增设了直流侧 chopper 装置,在直流母线电压较高时启动控制,有效保证直流母线电压在一定范围内波动而不触发过电压保护值停机。

[0018] 本发明采用定子磁链动态变化的双馈风电变流器控制模型推导过程:

a、基于定子电压定向的双馈感应发电机控制模型,正方向均按照电动机惯例选取,转量子量均折算到定子侧,设  $d$ - $q$  坐标系以同步速度旋转且  $q$  轴超前于  $d$  轴,则电机电压和磁链方程为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_2 \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_2 \psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R_s$ 、 $R_r$  为定、转子绕组等效电阻; $L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_m$  为定、转子绕组自感及互感; $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$  为  $d$ 、 $q$  轴定、转子电压; $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 、 $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  为  $d$ 、 $q$  轴定、转子电流; $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ 、 $\psi_{rd}$ 、 $\psi_{rq}$  为  $d$ 、 $q$  轴定、转子磁链; $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为同步角速度和转差角速度; $p$  为微分算子;

b、采用发电机定子电压定向控制,将定子电压综合矢量定向在  $d$  轴上,则有:

$$\begin{cases} u_{sd} = U_s \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $U_s$  表示定子电压综合矢量的幅值,这时  $d$  轴的位置就是定子电压综合矢量的位置;将检测到的定子三相电压经过  $3/2$  坐标变换,得到静止两相坐标系下的定子电压  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ ,可计算出定子电压矢量的位置,由此得到  $d$  轴的位置  $\theta_1$ ;

c、将电流传感器检测到的定子电流和转子电流经过坐标变换,得到旋转坐标系下的  $dq$  轴分量,通过式(2)计算可得定子磁链  $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ ;

d、忽略电机定子电阻,结合式(1)、(2)、(3),考虑发电机定子磁链变化,推导出双馈风

电变流器转子侧的控制电压方程如下：

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rd}}{dt} - (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_r i_{rq} + \frac{L_m}{L_r} U_{rd} + \frac{L_m \omega_r}{L_r} \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rq}}{dt} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_r i_{rd} + \frac{L_m}{L_r} U_{rq} - \frac{L_m \omega_r}{L_r} \psi_{rd} \end{cases} \quad (4)$$

e、在双馈风电变流器转子侧最大输出控制电压下，将 d 步骤得到的控制电压加入到双馈风电变流器，通过双馈风电变流器 PWM 调制的方式输出控制，以达到适应电网低频振荡的目的。

[0019] 下面以一个具体的实施列举例说明：

根据实际 1.5MW 双馈风电变流器系统参数进行实验，电网线电压 660VAC，电机参数(归算到定子侧)为： $R_s=2.4m\Omega$ ， $X_s=34.9m\Omega$ ， $R_r=3.3m\Omega$ ， $X_r=29.7m\Omega$ ， $X_m=1.005\Omega$ ，转子开口电压 1993V。全功率变流器试验台包括原动机和双馈发电机组、双馈风电变流器和模拟电网各种工况的变频电源，根据实际风场产生低频振荡的转速和功率进行试验台测试，转速 1100rpm，功率 50kW，采用常规控制方法的测试结果如图 5（上），通过图 5（上）可以看出，采用常规控制算法控制时，定子磁链波动剧烈，定子电流主要都是低频分量而几乎看不到工频分量，转子电流和母线电压波动也较大，从而导致双馈风电变流器母线过压而报故障脱网停机，多个风场多台双馈风电机组同时脱网停机对于电网稳定性影响巨大，为此，我们将通过控制模型的推导步骤得出 d、q 轴转子控制电压加入到双馈风电变流器中，具体控制效果见图 5（下），从中可以看出，加入动态磁链控制算法后的变流器控制平稳，定子磁链中的低频分量得到了有效的抑制，直流侧母线电压波动也大幅度减小。

[0020] 采用本发明控制模型的双馈风电变流器，由于对定子磁链变化进行了重新建模，使得双馈风电变流器适应电网电压变化的能力明显加强，除了可以有效适应电网低频振荡工况外，还可以适应电网电压不平衡、电压波动、电网故障（浅幅值电网电压跌落）等特殊电网工况，而无需额外设计控制策略，具有较好的适应性。图 6 对比了两种控制模型在电网电压不平衡时的控制效果，从 0.4s 开始至 1.1s 结束，电网电压不平衡度均为 7%，通过图 6（上）可以看出常规控制方法控制时，定子和转子电流均出现较为明显的不平衡，如果不采取任何措施的话，双馈风电机组会报“定子电流不平衡”而脱网停机，而如图 6（下）采用本发明方法控制时，定子和转子电流均没有出现不平衡分量，说明了本发明方法对于电网电压不平衡也具有较好适应性。

[0021] 对于具体实施方式的理解的描述仅仅是为帮助理解本发明，而不是用来限制本发明的。本领域技术人员均可以利用本发明的思想进行一些改动和变化，只要其技术手段没有脱离本发明的思想和要点，仍然在本发明的保护范围之内。

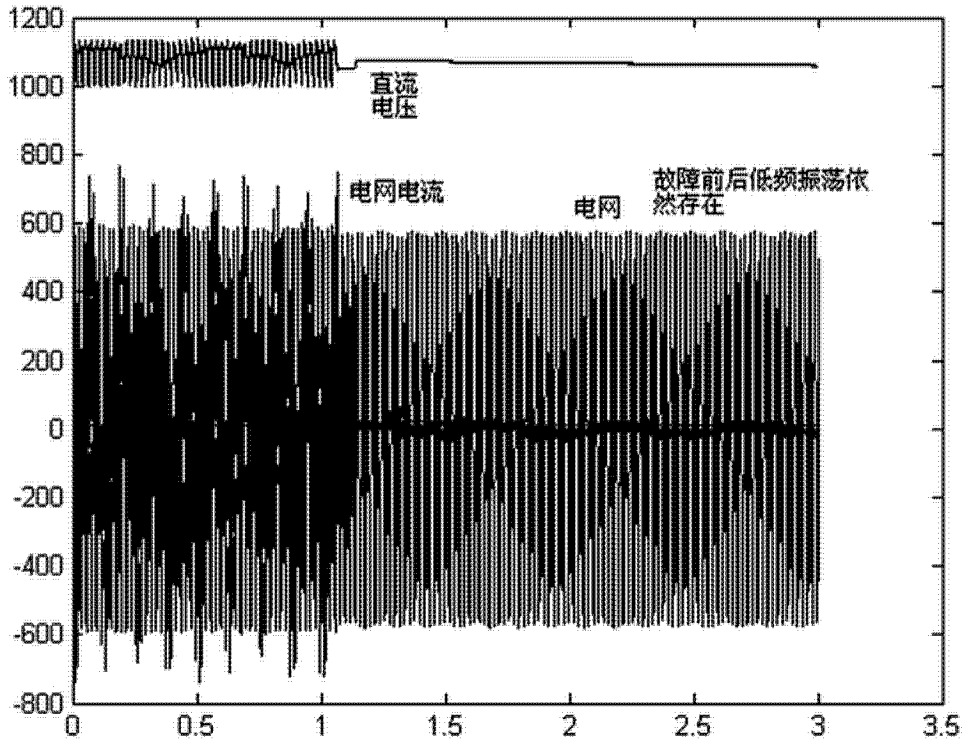


图 1

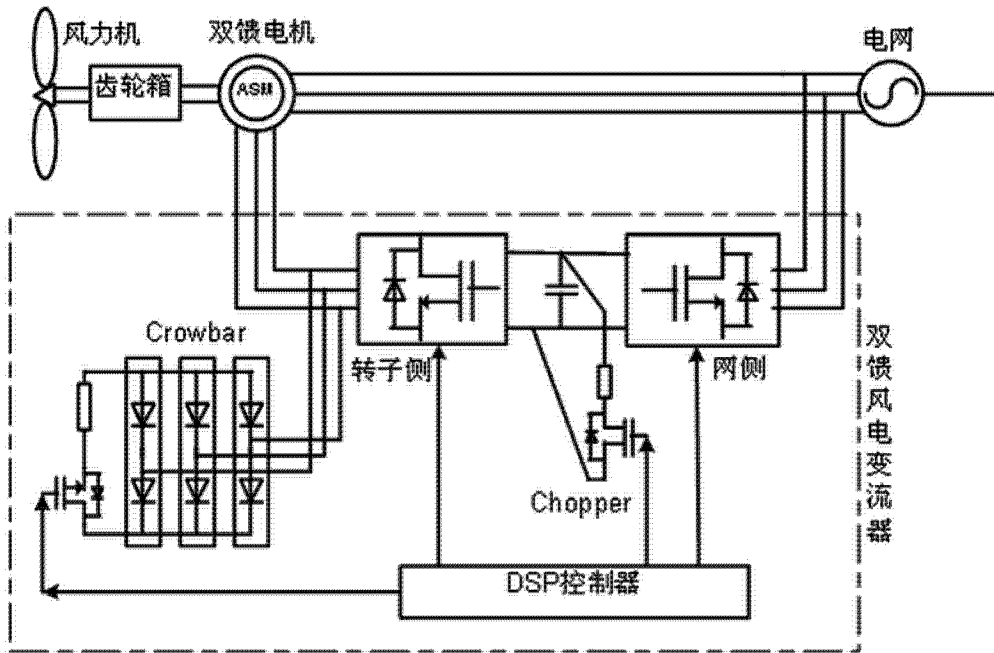


图 2

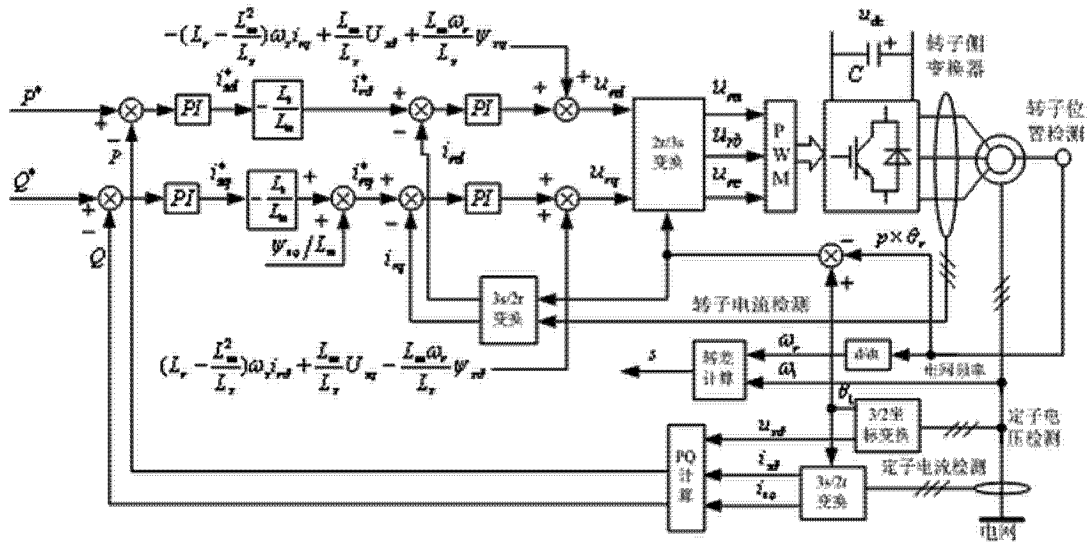


图 3



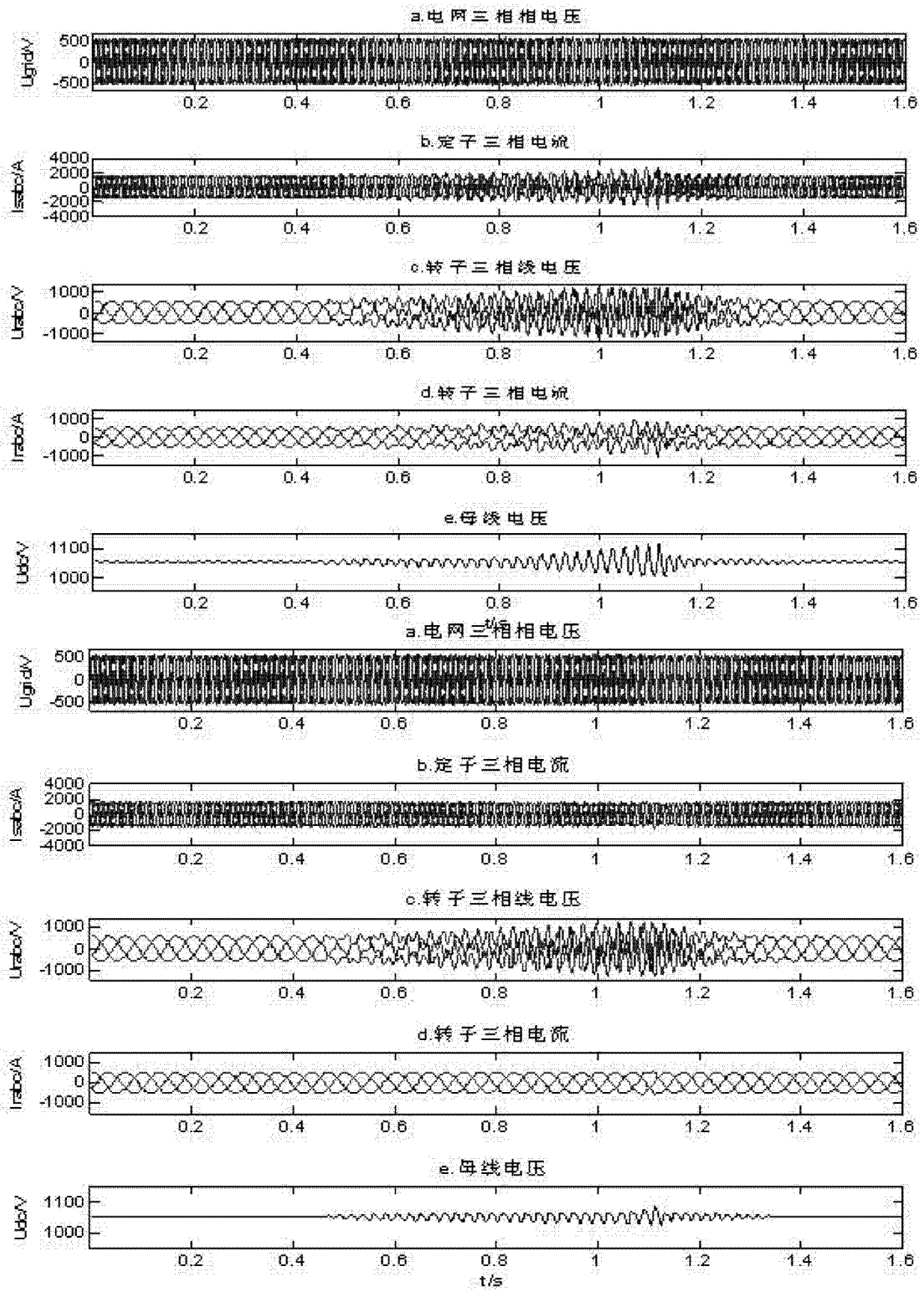


图 4

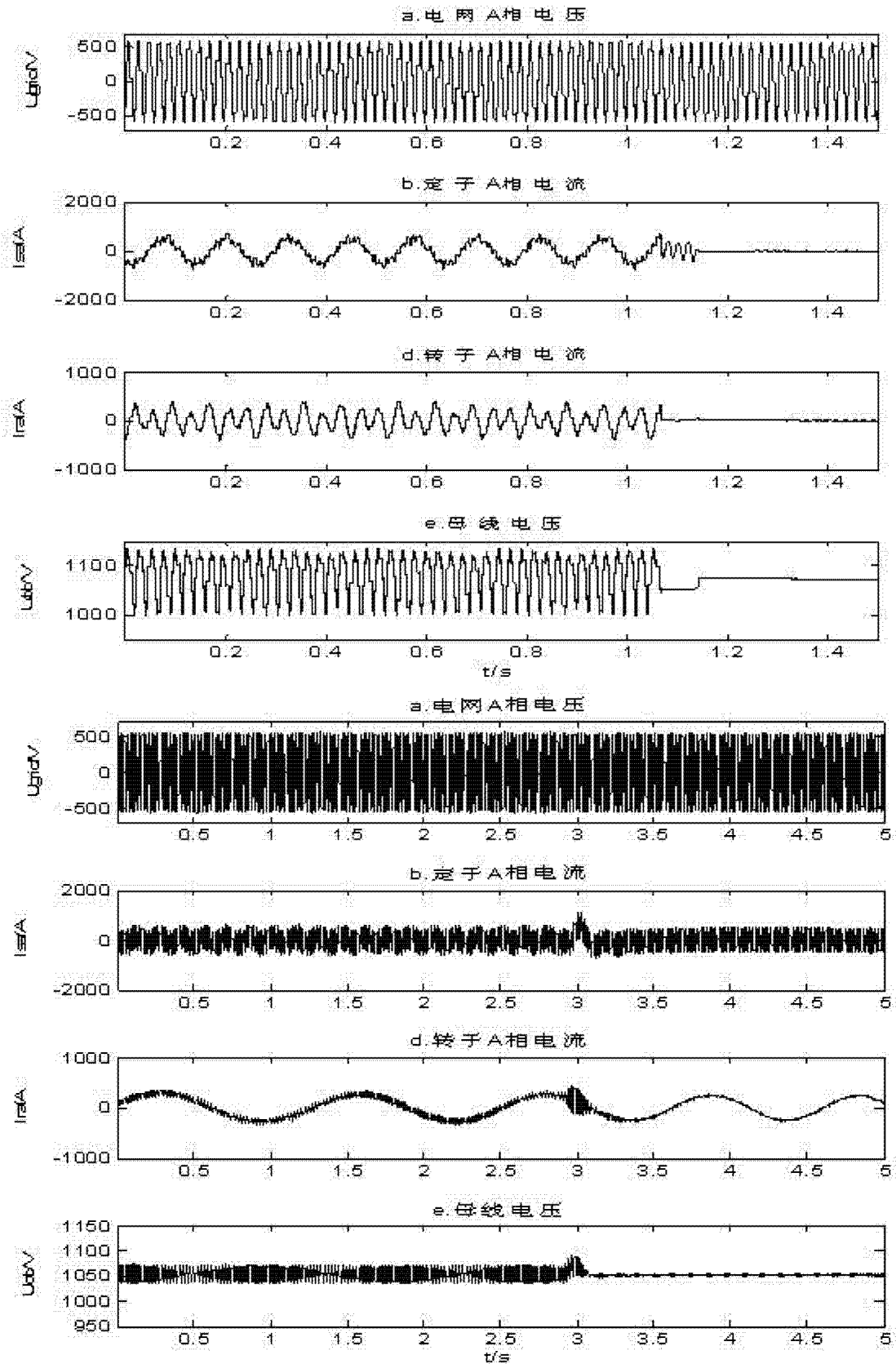


图 5

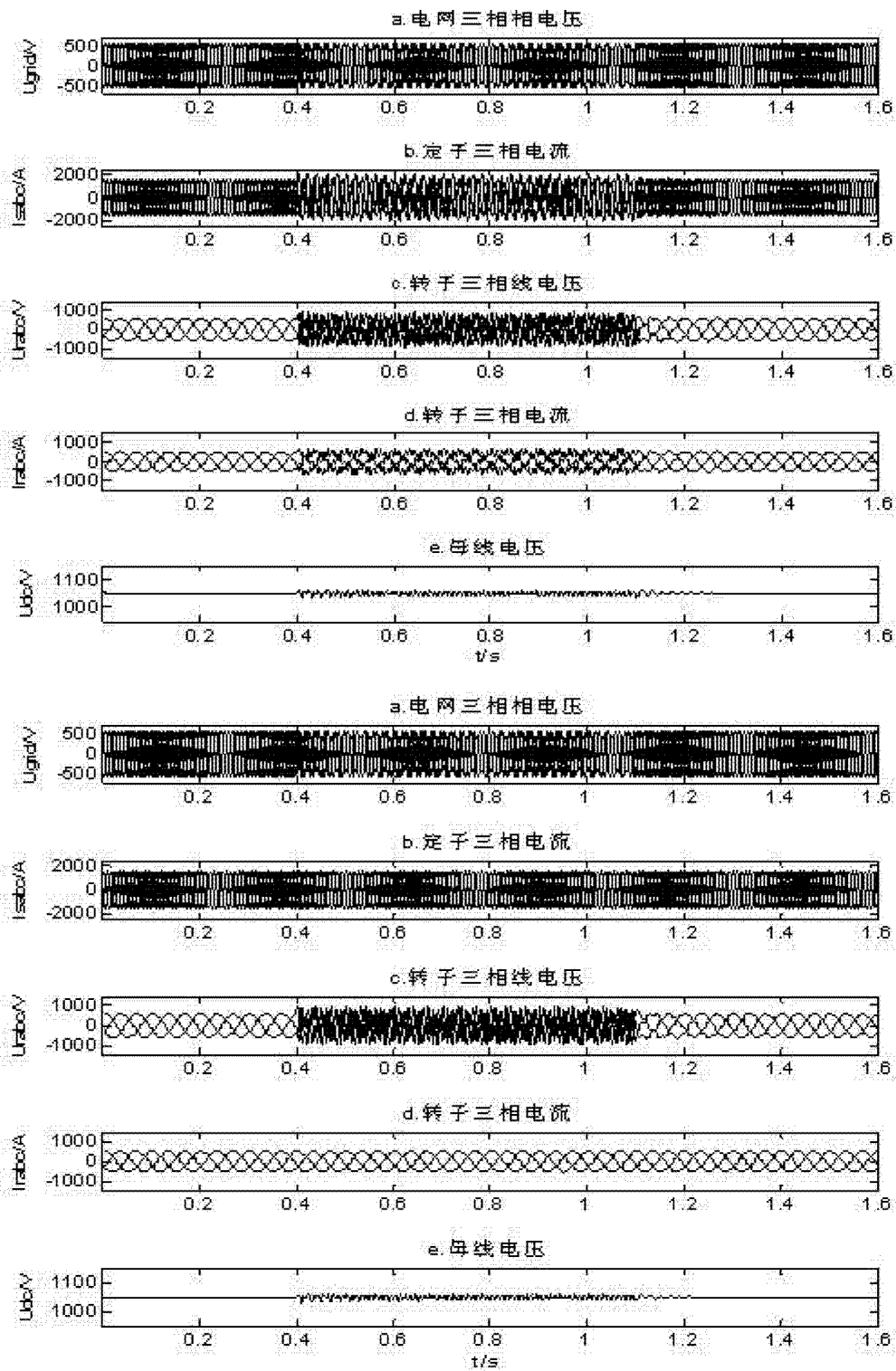


图 6