



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109657380 A

(43)申请公布日 2019. 04. 19

(21)申请号 201811596764.6

(22)申请日 2018.12.26

(71)申请人 华北电力大学

地址 102206 北京市昌平区北农路2号

(72)发明人 王彤 高明阳 王增平

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

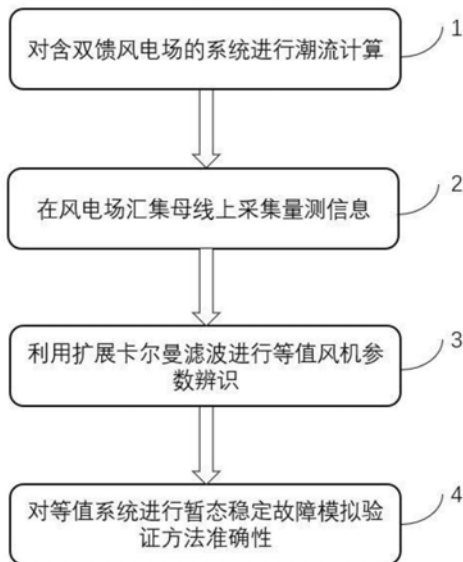
权利要求书3页 说明书5页 附图5页

## (54)发明名称

一种基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法

## (57)摘要

本发明公开一种基于扩展卡尔曼滤波的双馈风力发电场动态等值方法。该方法包括：获取由多台双馈风力发电机组成的双馈风电场的参数；根据所有双馈风力发电机的数据进行含双馈风电场电力系统的潮流计算；采集风电场汇集母线上的数据作为量测信息；利用扩展卡尔曼滤波的方法对等值风机电抗参数及控制器参数进行动态辨识；对等值系统进行暂态稳定故障模拟验证该方法的准确性。本发明提供了一种有效的双馈风电场动态等值方法，利用在线参数估计的方法将双馈风电场等值成一台双馈风力发电机，避免了对双馈风电场建模时，由于其机组数量众多，造成的整个电场的模型阶数过高的问题，在保证仿真精度的情况下极大地提高了数据处理和计算结果分析的效率。



1. 一种基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法,其特征在于,该方法首先获取由多台双馈风力发电机组成的双馈风电场的参数;基于所有双馈风力发电机的数据进行含双馈风电场电力系统的潮流计算并采集风电场汇集母线上的数据作为量测信息;然后利用扩展卡尔曼滤波的方法对等值风机电抗参数及控制器参数进行动态辨识;最后将等值风机代替风电场接入多机系统;并对系统进行暂态稳定故障模拟验证该方法的准确性。

2. 如权利要求1所述的基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法,其特征在于,该方法具体包括以下步骤:包括:

- a、对含双馈风电场的系统进行潮流计算;
- b、在风电场的汇集母线上采集量测信息;
- c、利用扩展卡尔曼滤波进行等值风机参数辨识;
- d、对等值系统进行暂态稳定故障模拟验证该方法的准确性。

3. 根据权利要求2所述的基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法,其特征在于,在步骤a中,首先对含双馈风电场的系统进行潮流计算得到稳态运行时的数据,并对每台双馈风力发电机建立完整的12阶动态模型如式(1)、(2)所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{ds}}{dt} = \frac{\omega_0 X_{rr} (X_{ss} I_{qs} + X_m I_{qr} - U_{ds}) - \omega_0 X_m (s(X_m I_{qs} + X_{rr} I_{qr}) - U_{dr})}{X_{ss} X_{rr} - X_m^2} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = \frac{\omega_0 X_{rr} (-X_{ss} I_{ds} - X_m I_{dr} - U_{qs}) - \omega_0 X_m (-s(X_m I_{ds} + X_{rr} I_{dr}) - U_{qr})}{X_{ss} X_{rr} - X_m^2} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} = \frac{\omega_0 X_m (X_{ss} I_{qs} + X_m I_{qr} - U_{ds}) - \omega_0 X_{ss} (s(X_m I_{qs} + X_{rr} I_{qr}) - U_{dr})}{X_m^2 - X_{ss} X_{rr}} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = \frac{\omega_0 X_m (-X_{ss} I_{ds} - X_m I_{dr} - U_{qs}) - \omega_0 X_{ss} (-s(X_m I_{ds} + X_{rr} I_{dr}) - U_{qr})}{X_m^2 - X_{ss} X_{rr}} \\ ps = \frac{1}{T_J} [P_e - P_m - D(s - s_0)] \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = K_{iPs} (P_s^* - P_s) \\ \frac{dx_2}{dt} = K_{iQs} (Q_s^* - Q_s) \\ \frac{dx_3}{dt} = K_{ilqr} (I_{qr\_rot}^* - I_{qr\_rot}) \\ \frac{dx_4}{dt} = K_{ildr} (I_{dr\_rot}^* - I_{dr\_rot}) \\ \frac{dx_5}{dt} = K_{iVd} (I_{Vd}^* - I_{Vd}) \\ \frac{dx_6}{dt} = K_{ildr3} (I_{dr3\_rot}^* - I_{dr3\_rot}) \\ \frac{dx_7}{dt} = K_{ilqr3} (I_{qr3\_rot}^* - I_{qr3\_rot}) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $I_{dr}$ 、 $I_{qr}$ 、 $I_{ds}$ 、 $I_{qs}$ 分别为双馈感应发电机转子侧、定子侧d、q轴电流分量;  $s$ 为双馈感应发电机转差率;  $x_1$ 为机侧变流器外环有功功率控制对应的状态变量;  $x_2$ 为机侧变流器外环无功功率控制对应的状态变量;  $x_3$ 为机侧变流器内环q轴电流控制对应的状态变量;  $x_4$ 为机侧变流器内环d轴电流控制对应的状态变量;  $x_5$ 为网侧变流器外环直流电压控制对应的状态变量;  $x_6$ 为网侧变流器内环d轴电流控制对应的状态变量;  $x_7$ 为网侧变流器内环q轴电流控制对应的状态变量。

4. 根据权利要求2所述的基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法, 其特征在于, 在步骤b中, 具体包括:

由潮流计算得到的双馈风电场稳态运行值及建立的完整动态模型, 求出需要利用的状态变量初始值; 同时在双馈风电场的汇集母线处得到进行在线参数辨识所需要的量测量。

5. 根据权利要求2所述的基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法, 其特征在于, 在步骤c中, 具体包括:

c1、在量测信息 $z$ 中加入噪声变量(高斯白噪声)

c2、由双馈风机的动态方程及量测量对应的量测方程, 计算出扩展卡尔曼滤波迭代过程需要的参数。具体的过程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] + w(t) \\ z(t) = h[x(t), t] + v(t) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}(t) = \left. \frac{\partial f[x(t), u(t), t]}{\partial x} \right|_{x(t)=\hat{x}(t)} \Delta x(t) + w(t) \\ \Delta z(t) = \left. \frac{\partial h[x(t), t]}{\partial x} \right|_{x(t)=\hat{x}(t)} \Delta x(t) + v(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta x_k = \Phi_{k/k-1} \Delta x_{k-1} + w_{k-1} \\ \Delta z_k = H_k \Delta x_k + v_k \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta \hat{x}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \Delta \hat{x}_{k-1} \\ P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + Q \\ K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R)^{-1} \\ \Delta \hat{x}_k = \Delta \hat{x}_{k/k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}) \\ P_k = P_{k/k-1} - K_k H_k P_{k/k-1} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $x_k$  为状态变量,  $z_k$  为量测量;  $P_{k/k-1}$ 、 $P_k$  分别为先验方差矩阵和后验方差矩阵;  $K_k$  为增益系数;  $\Phi_{k/k-1}$  为状态转移矩阵,  $H_k$  为观测矩阵:

$$\begin{cases} \Phi_{k/k-1} = I + T_s \left. \frac{\partial f[x(t_{k-1}), u(t_{k-1}), t_{k-1}]}{\partial x(t_{k-1})} \right|_{x(t_{k-1}) = \hat{x}_{k-1}} \\ H_k = \left. \frac{\partial h[x(t_k), t_k]}{\partial x(t_k)} \right|_{x(t_{k-1}) = \hat{x}_{k/k-1}} \end{cases} \quad (7)$$

c3、利用扩展卡尔曼滤波的方法对双馈风力发电机的电抗参数和控制器中PI环节的控制系数进行辨识,得到等值风力发电机对应的参数,将双馈风电场等值成一台大容量机组。

6. 根据权利要求2所述的基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法,其特征在于,在步骤d中,具体包括:

d1、利用等值双馈风机代替双馈风电场接入系统;

d2、令双馈风机输出功率固定,分别对等值前后的系统进行三相短路故障和单相接地故障的模拟;

d3、令双馈风机输出功率随机变化,分别对等值前后的系统进行三相短路故障的模拟;

d4、分别对d2、d3两次等值前后汇集母线的有功、电压进行对比,验证该方法的有效性,若等值前后功率、电压的误差满足精度要求,则说明该双馈风电场动态当值方法是正确的。

## 一种基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及风电系统领域,具体地,涉及一种基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法。

### 背景技术

[0002] 在全球经济高速发展的热潮下,资源浪费和环境污染日趋严重,开发和利用可再生的新能源也逐渐成为了时代的主题。作为其中的典型代表,风力发电事业由于其相对成熟的技术及低廉的成本成为了如今发展最快的新能源技术。但是,近年来,随着大规模的风电并网后,会对电力系统的稳定性产生明显的影响。为了制定出科学合理的电网运行调控方式,必须对含风电的电力系统进行大量的仿真研究。如果在这种反复的仿真中都采用风电场的详细模型,那么无疑会大大减慢仿真速度,从而造成大量时间的浪费。

[0003] 目前,在研究风电场电力系统的各种动态稳定问题时使用一台大容量的风力发电机组来代替整个风电场,从而达到降低仿真系统搭建难度、提高仿真计算速度的目的,因此无论是理论研究还是工程实际都希望能够得到准确描述大规模风电场整体特性的风电场模型。一个风电场通常由几十台甚至几百台风电机组构成,但其总容量仅相当于一台大型的火力发电机,尤其是对于双馈风力发电机组(DFIG)这样含有风力机、发电机、电力电子变流器及其控制器的风电机组,可以用一个十几阶的模型来描述,那么整个风电场的模型阶数可能超过一千阶。由此造成其容量的大小和模型的复杂程度很不匹配,而且在研究含风电电力系统的稳定性问题时,重点关注的是风电场的整体动态特性,而不是场内每台机组的具体动态,因此对大规模风电场进行动态等值,从而进行模型降阶是非常有必要的。

[0004] 在实现本发明的过程中,发明人发现现有的风力发电机动态等值技术中至少存在结果不精确、计算复杂度高缺陷。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法,以提高双馈风电场动态等值的计算精度和计算效率,并适用于风电系统的暂态稳定分析。

[0006] 为实现上述目的,本发明采用的技术方案是:一种基于扩展卡尔曼滤波的双馈风电场动态等值方法,步骤为:

[0007] a、对含双馈风电场的系统进行潮流计算;

[0008] b、在风电场的汇集母线上采集量测信息;

[0009] c、利用扩展卡尔曼滤波进行等值风机参数辨识;

[0010] d、对等值系统进行暂态稳定故障模拟验证该方法的准确性。

[0011] 进一步地,所述步骤a,具体包括:

[0012] a1、利用双馈风电场的数据对含双馈风电场的电力系统进行稳态运行的潮流计算;

[0013] a2、对每台双馈风力发电机组建立完整的动态模型;

[0014]

$$\begin{cases}
 \frac{dI_{ds}}{dt} = \frac{\omega_0 X_{rr} (X_{ss} I_{qs} + X_m I_{qr} - U_{ds}) - \omega_0 X_m (s(X_m I_{qs} + X_{rr} I_{qr}) - U_{dr})}{X_{ss} X_{rr} - X_m^2} \\
 \frac{dI_{qs}}{dt} = \frac{\omega_0 X_{rr} (-X_{ss} I_{ds} - X_m I_{dr} - U_{qs}) - \omega_0 X_m (-s(X_m I_{ds} + X_{rr} I_{dr}) - U_{qr})}{X_{ss} X_{rr} - X_m^2} \\
 \frac{dI_{dr}}{dt} = \frac{\omega_0 X_m (X_{ss} I_{qs} + X_m I_{qr} - U_{ds}) - \omega_0 X_{ss} (s(X_m I_{qs} + X_{rr} I_{qr}) - U_{dr})}{X_m^2 - X_{ss} X_{rr}} \\
 \frac{dI_{qr}}{dt} = \frac{\omega_0 X_m (-X_{ss} I_{ds} - X_m I_{dr} - U_{qs}) - \omega_0 X_{ss} (-s(X_m I_{ds} + X_{rr} I_{dr}) - U_{qr})}{X_m^2 - X_{ss} X_{rr}} \\
 ps = \frac{1}{T_J} [P_e - P_m - D(s - s_0)]
 \end{cases}$$

(1)

$$[0015] \begin{cases}
 \frac{dx_1}{dt} = K_{iPs} (P_s^* - P_s) \\
 \frac{dx_2}{dt} = K_{iQs} (Q_s^* - Q_s) \\
 \frac{dx_3}{dt} = K_{iIqr} (I_{qr\_rot}^* - I_{qr\_rot}) \\
 \frac{dx_4}{dt} = K_{iIdr} (I_{dr\_rot}^* - I_{dr\_rot}) \\
 \frac{dx_5}{dt} = K_{iVd} (I_{vd}^* - I_{vd}) \\
 \frac{dx_6}{dt} = K_{iIdr3} (I_{dr3\_rot}^* - I_{dr3\_rot}) \\
 \frac{dx_7}{dt} = K_{iIqr3} (I_{qr3\_rot}^* - I_{qr3\_rot})
 \end{cases} \quad (2)$$

[0016] 其中,  $I_{dr}$ 、 $I_{qr}$ 、 $I_{ds}$ 、 $I_{qs}$  分别为双馈感应发电机转子侧、定子侧d、q轴电流分量;  $s$  为双馈感应发电机转差率;  $x_1$  为机侧变流器外环有功功率控制对应的状态变量;  $x_2$  为机侧变流器外环无功功率控制对应的状态变量;  $x_3$  为机侧变流器内环q轴电流控制对应的状态变量;  $x_4$  为机侧变流器内环d轴电流控制对应的状态变量;  $x_5$  为网侧变流器外环直流电压控制对应的状态变量;  $x_6$  为网侧变流器内环d轴电流控制对应的状态变量;  $x_7$  为网侧变流器内环q轴电流控制对应的状态变量。

[0017] 进一步地, 所述步骤b, 具体包括:

[0018] b1、由潮流计算得到的双馈风电场稳态运行值及建立的完整动态模型, 求出需要利用的状态变量初始值;

[0019] 状态变量初始值包括双馈感应发电机的定转子侧电流、PI控制环节的电流参考值及发电机转差率。

[0020] b2、在双馈风电场的汇集母线处得到进行在线参数辨识所需要的量测信息；

[0021] 量测信息取双馈风力发电机组内部的电流，包括 $I_{ds}$ 、 $I_{qs}$ 、 $I_{dr}$ 、 $I_{qr}$ 、 $I_{dr3}$ 、 $I_{qr3}$ 。

[0022] b3、将选要辨识的等值双馈风机的电抗参数和PI环节控制系数作为扩展状态变量纳入状态变量矩阵中。

[0023] 进一步地，所述步骤c，具体包括：

[0024] c1、在量测信息 $z$ 中加入噪声变量（高斯白噪声）

[0025] c2、由双馈风机的动态方程及量测量对应的量测方程，计算出扩展卡尔曼滤波迭代过程需要的参数。具体的过程如下：

$$[0026] \begin{cases} \dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] + w(t) \\ z(t) = h[x(t), t] + v(t) \end{cases} \quad (3)$$

$$[0027] \begin{cases} \Delta \dot{x}(t) = \left. \frac{\partial f[x(t), u(t), t]}{\partial x} \right|_{x(t)=\hat{x}(t)} \Delta x(t) + w(t) \\ \Delta z(t) = \left. \frac{\partial h[x(t), t]}{\partial x} \right|_{x(t)=\hat{x}(t)} \Delta x(t) + v(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$[0028] \begin{cases} \Delta x_k = \Phi_{k/k-1} \Delta x_{k-1} + w_{k-1} \\ \Delta z_k = H_k \Delta x_k + v_k \end{cases} \quad (5)$$

$$[0029] \begin{cases} \Delta \hat{x}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \Delta \hat{x}_{k-1} \\ P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + Q \\ K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R)^{-1} \\ \Delta \hat{x}_k = \Delta \hat{x}_{k/k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}) \\ P_k = P_{k/k-1} - K_k H_k P_{k/k-1} \end{cases} \quad (6)$$

[0030] 其中， $x_k$ 为状态变量， $z_k$ 为量测量； $P_{k/k-1}$ 、 $P_k$ 分别为先验方差矩阵和后验方差矩阵； $K_k$ 为增益系数； $\Phi_{k/k-1}$ 为状态转移矩阵， $H_k$ 为观测矩阵：

$$[0031] \begin{cases} \Phi_{k/k-1} = I + T_s \left. \frac{\partial f[x(t_{k-1}), u(t_{k-1}), t_{k-1}]}{\partial x(t_{k-1})} \right|_{x(t_{k-1})=\hat{x}_{k-1}} \\ H_k = \left. \frac{\partial h[x(t_k), t_k]}{\partial x(t_k)} \right|_{x(t_k)=\hat{x}_{k/k-1}} \end{cases} \quad (7)$$

[0032] c3、利用扩展卡尔曼滤波的方法对双馈风力发电机的电抗参数和控制器中PI环节的控制系数进行辨识，得到等值风力发电机对应的参数，将双馈风电场等值成一台大容量机组，其容量为各双馈风力发电机功率之和。

[0033] 进一步地，所述步骤d，具体包括：

[0034] d1、利用等值双馈风机代替双馈风电场接入系统；

[0035] d2、令双馈风机输出功率固定，分别对等值前后的系统进行三相短路故障和单相接地故障的模拟；

[0036] d3、令双馈风机输出功率随机变化，分别对等值前后的系统进行单相接地短路故障的模拟；

[0037] d4、分别对d2、d3两次等值前后汇集母线的有功、母线电压进行对比，验证该方法的有效性。若等值前后功率、电压的误差满足精度要求，则说明该双馈风电场动态当值方法是正确的。

[0038] 本发明提供的基于扩展卡尔曼滤波的双馈风力发电机动态等值方法，由于包括：获取由多台双馈风力发电机组成的双馈风电场的参数；基于所有双馈风力发电机的数据进行含双馈风电场电力系统的潮流计算并采集风电场汇集母线上的数据作为量测信息；然后利用扩展卡尔曼滤波的方法对等值风机电抗参数及控制器参数进行动态辨识；最后将等值风机代替风电场接入多机系统；并对系统进行暂态稳定故障模拟验证该方法的准确性。该动态等值方法，可以克服现有技术结果不精确、计算复杂度高的缺点，具有误差小、计算速度快的优点。

[0039] 本发明的其它特征和优点将在随后的说明书中阐述，并且，部分地从说明书中变得显而易见，或者通过实施本发明而了解。

[0040] 下面通过附图和实施例，对本发明的技术方案做进一步的详细描述。

## 附图说明

[0041] 附图用来提供对本发明的进一步理解，并且构成说明书的一部分，与本发明的实施例一起用于解释本发明，并不构成对本发明的限制。在附图中：

[0042] 图1为本发明基于基于扩展卡尔曼滤波的双馈风力发电机动态等值方法的流程示意图；

[0043] 图2为本发明所利用的扩展卡尔曼滤波的迭代过程示意图；

[0044] 图3为本发明所利用的含双馈风电场的系统示意图；

[0045] 图4为本发明将等值后的双馈风机代替双馈风电场并入系统后进行三相短路故障模拟后得到的汇集母线有功功率对比结果。

[0046] 图5为本发明将等值后的双馈风机代替双馈风电场并入系统后进行三相短路故障模拟后得到的汇集母线电压对比结果。

[0047] 图6为本发明将等值后的双馈风机代替双馈风电场并入系统后进行单相接地短路故障模拟后得到的汇集母线有功功率对比结果。

[0048] 图7为本发明将等值后的双馈风机代替双馈风电场并入系统后进行单相接地短路故障模拟后得到的汇集母线电压对比结果。

[0049] 图8为本发明令等值前后的双馈风机均随机出力时，对系统进行三相短路故障模拟后得到的汇集母线有功功率对比结果。

[0050] 图9为本发明令等值前后的双馈风机均随机出力时，对系统进行三相短路故障模拟后得到的汇集母线电压对比结果。



## 具体实施方式

[0051] 以下结合附图对本发明的优选实施例进行说明,应当理解,此处所描述的优选实施例仅用于说明和解释本发明,并不用于限定本发明。

[0052] 根据本发明实施例,提供了一种基于扩展卡尔曼滤波的双馈风力发电机动态等值方法,解决很多双馈风机动态等值方法结果不精确、计算复杂度高的问题。

[0053] 步骤1,选择测试系统IEEERTS-79,将由三台双馈风力发电机组的双馈风电场并入汇集母线4处,设定双馈风电场各台风电机组的功率等参数值,对系统进行稳态潮流计算的求解,并对每台双馈风力发电机建立12阶动态模型。

[0054] 步骤2,利用动态模型和等值双馈风机需要辨识的参数确定扩展后的状态变量矩阵,由系统的稳态运行值和风机的动态模型求解进行扩展卡尔曼滤波需要的状态转移矩阵、量测矩阵、先验方差矩阵、后验方差矩阵、增益矩阵。

[0055] 步骤3,进行等值迭代,得到等值后的一台双馈风力发电机组,将其代替整个风电场并入汇集母线4。

[0056] 步骤4,对等值前后的系统,分别在母线9处进行三相短路故障和单相接地短路故障的模拟,对比时域仿真后汇集母线处的有功、无功功率及电压的变化曲线,等值前后结果误差小于0.1%。

[0057] 步骤5,令等值前后风电系统的均随机出力,在母线8处进行三相短路故障的模拟,对比时域仿真后汇集母线处的有功及电压的变化曲线,等值前后结果误差仍然小于0.1%,以上均说明该等值方法的有效性。

[0058] 综上所述,本发明上述实施例的基于扩展卡尔曼滤波的双馈风力发电机动态等值方法,包括:对含双馈风电场的系统进行潮流计算;在风电场的汇集母线上采集量测信息;利用扩展卡尔曼滤波进行等值风机参数辨识;对等值系统进行暂态稳定故障模拟验证该方法的准确性。该双馈风电场动态等值方法,具有计算复杂度低、收敛性好的优点,解决了现有技术中结果不精确、计算复杂度高等问题。

[0059] 最后应说明的是:以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,对于本领域的技术人员来说,其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换。凡在本发明的精神和原则之内,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

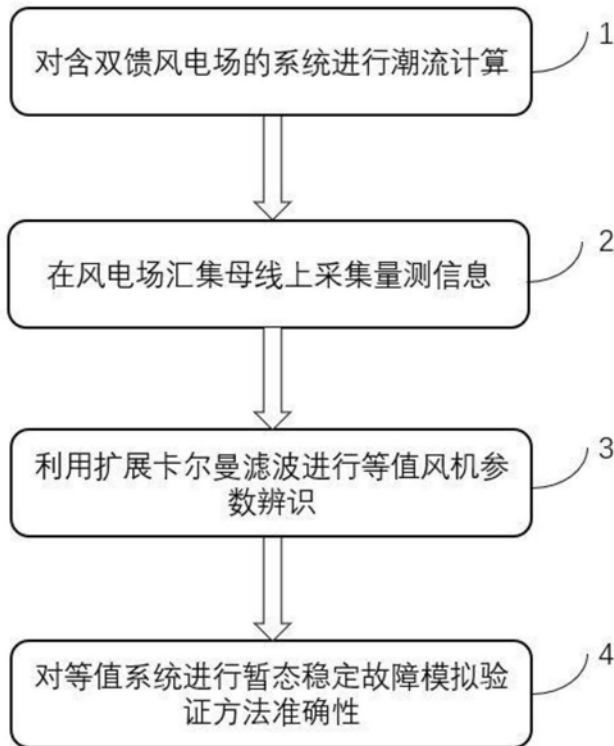


图1

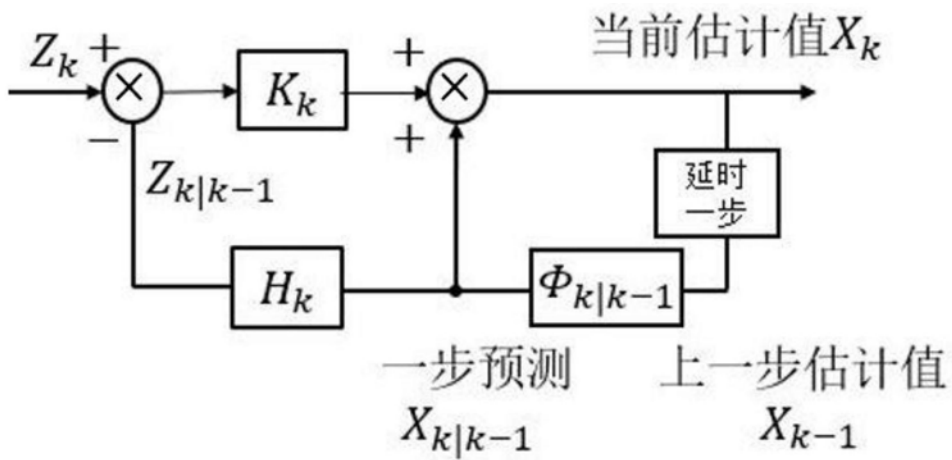


图2

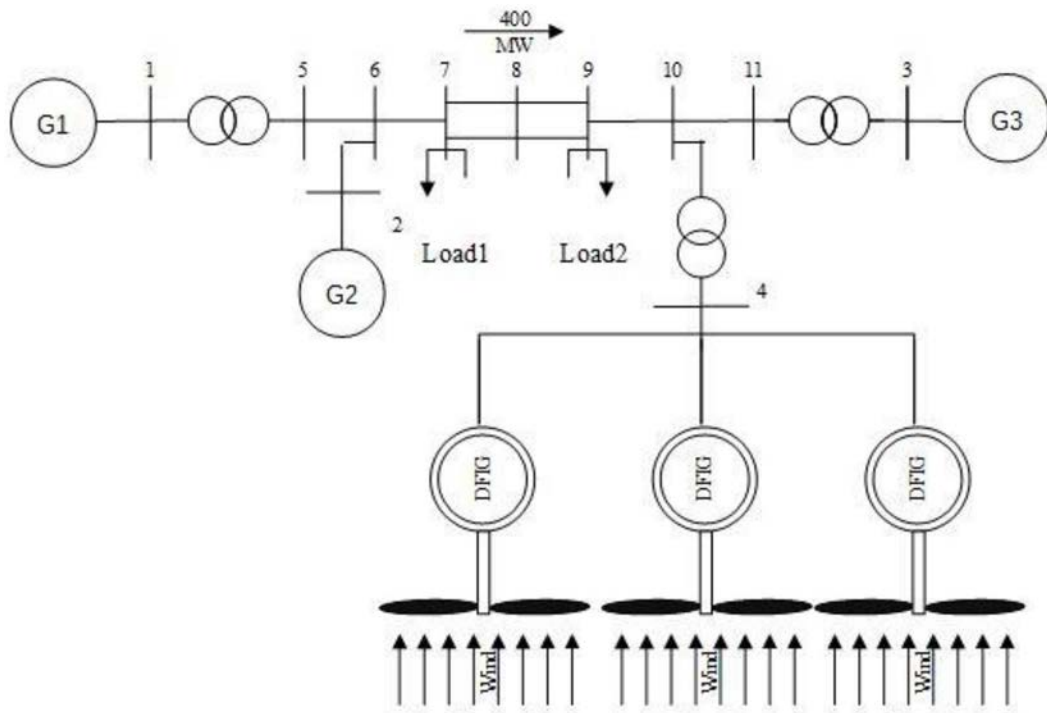


图3

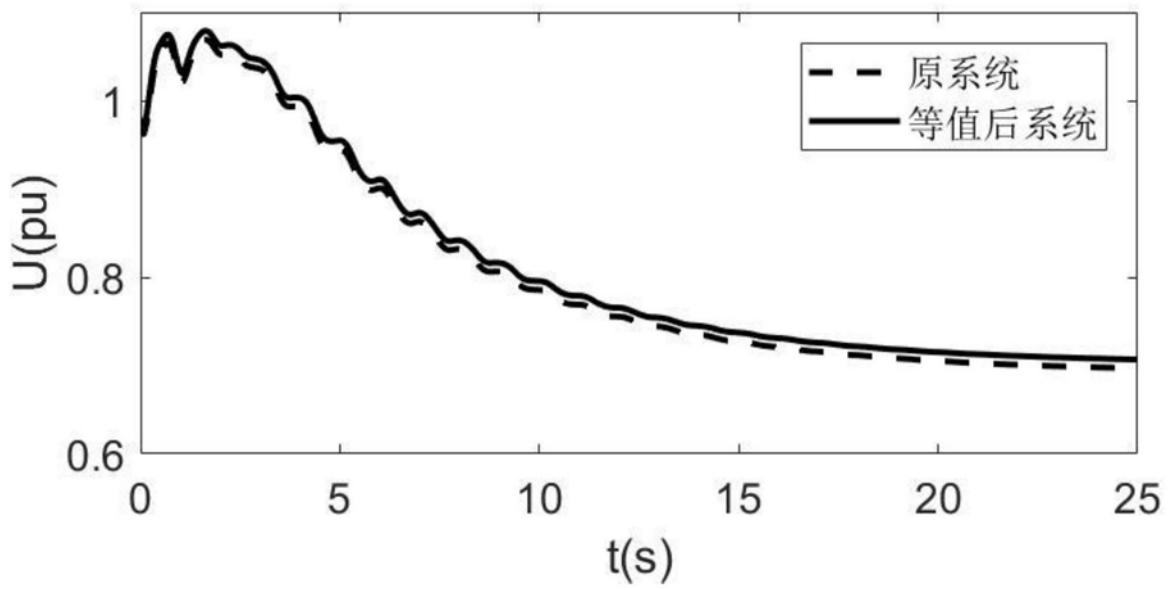


图4

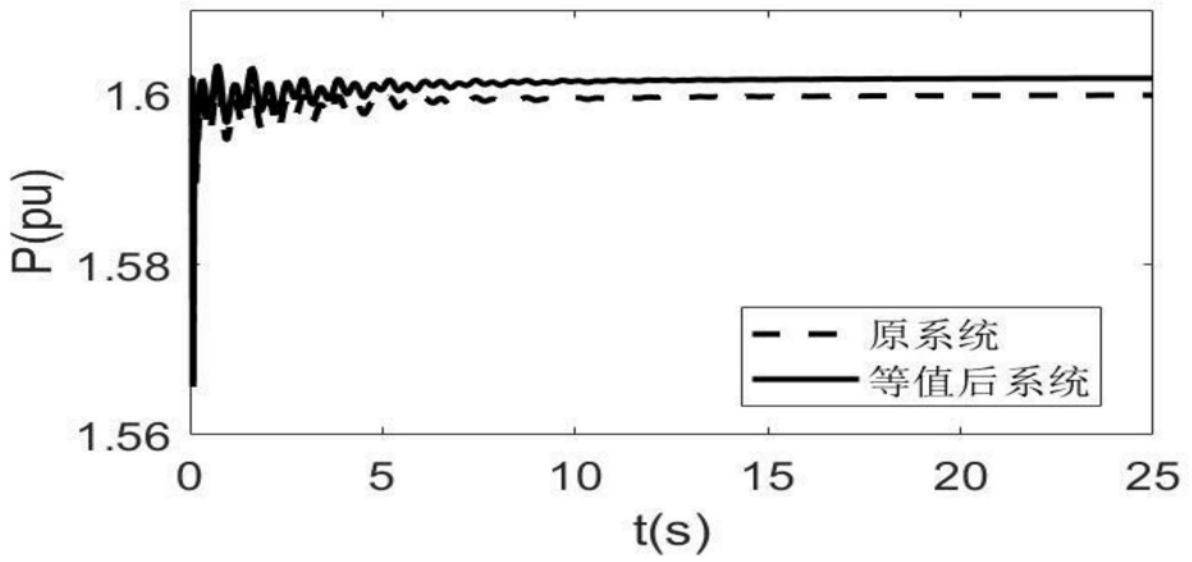


图5

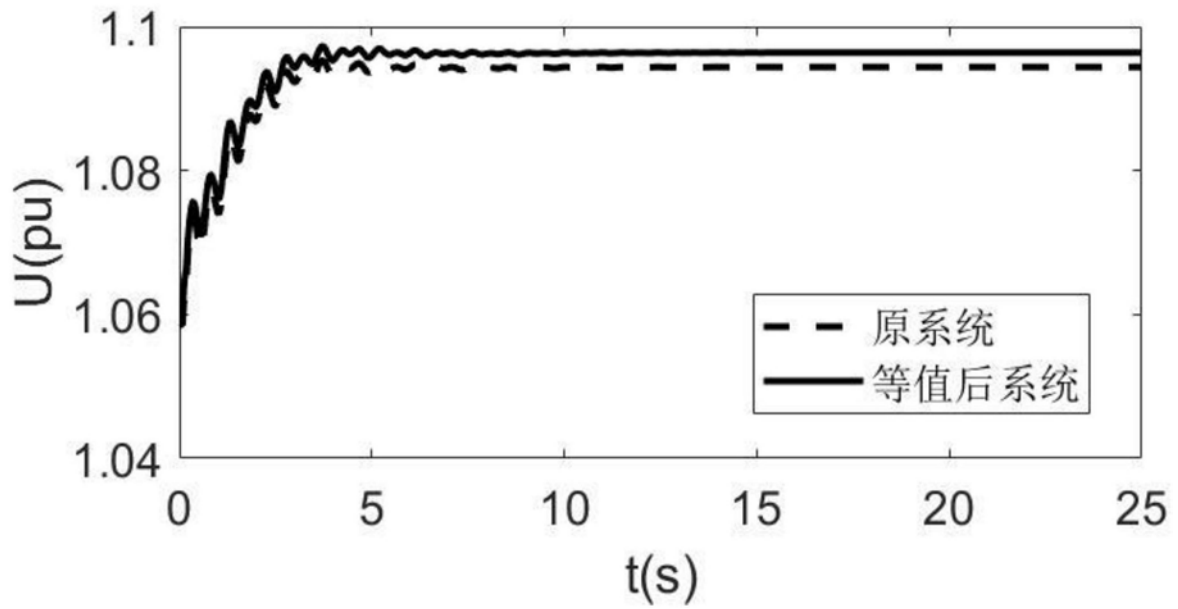


图6

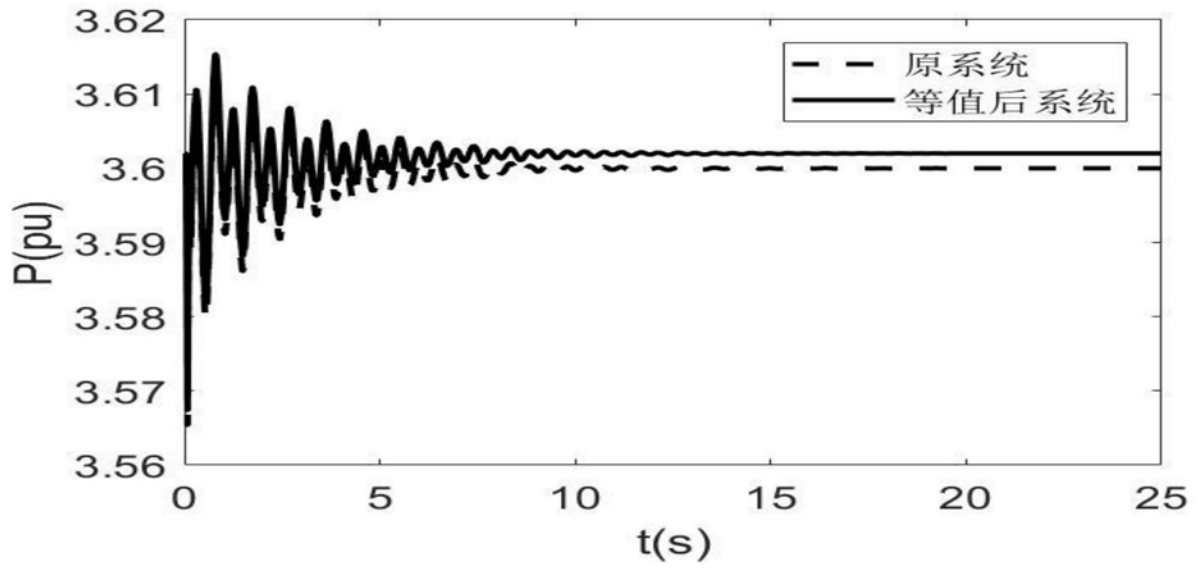


图7

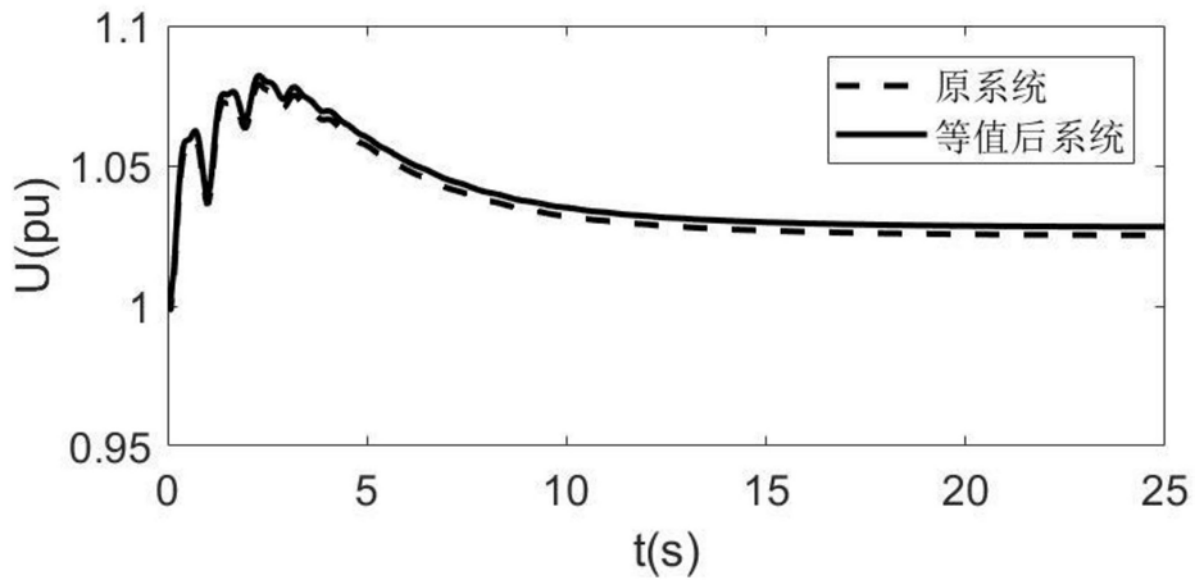


图8

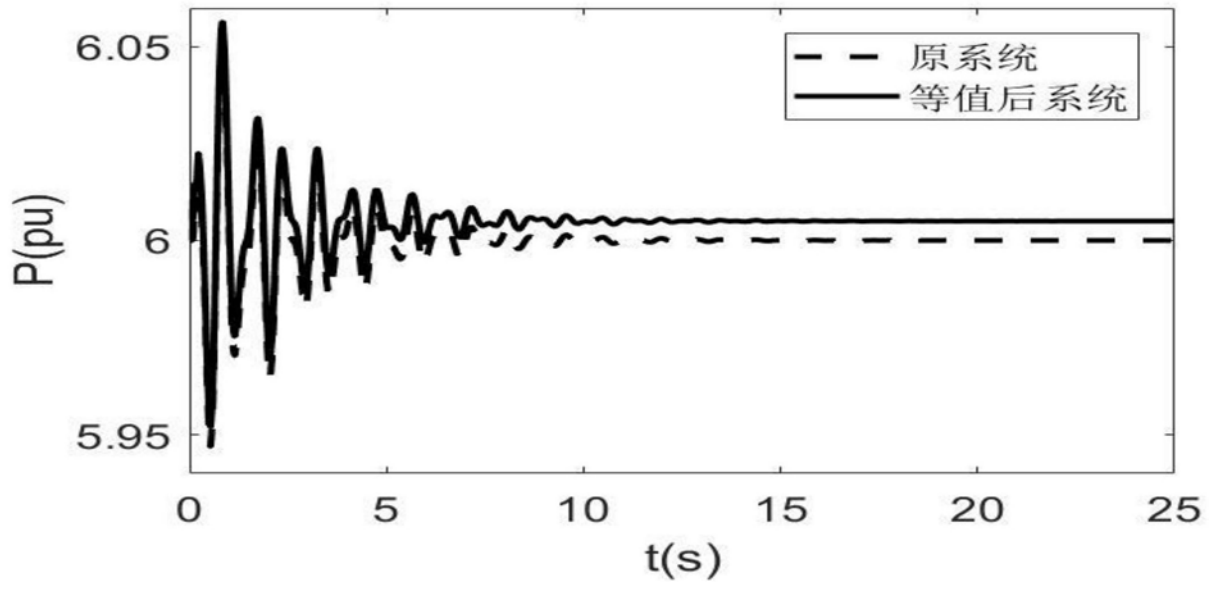


图9