

基于虚拟同步电机的负荷换流器建模及参数设计

何光辉¹, 张仰飞¹, 陈光宇¹, 袁宇波², 张宸宇², 史明明²

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:随着电力电子技术的不断发展, 负荷换流器不断接入电网中, 电网逐步发展为低惯量、欠阻尼网络, 电网的安全性和稳定性问题日益突出。传统负荷换流器控制下, 负荷难以有效的参与电网动态调节, 而虚拟同步电机技术能够为系统提供惯性支撑, 因此受到广泛关注。文中介绍了负荷虚拟同步电机的工作原理, 建立了负荷虚拟同步电机的小信号模型, 给出了一种负荷虚拟同步电机的控制参数设计方法, 该方法可兼顾系统的稳定性和动态性能。Matlab/Simulink 仿真结果表明该方法中小信号模型的正确性和设计方法的有效性, 能够对电网的稳定提供支撑作用。

关键词:小信号模型; 参数设计; 稳定性

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)01-0079-07

0 引言

近几年, 随着新能源发电设备不断接入电网, 电网逐步发展为以电力电子换流器为主导的低惯量、欠阻尼网络, 电网的稳定性和安全性问题越来越突出^[1]。当前研究的重点是面向分布式电源, 通过构建虚拟同步发电机, 使含有电力电子换流器的分布式电源模拟传统同步发电机的运行特性, 为系统稳定性提供支撑作用。然而, 随着电力电子技术的不断发展, 大量的负荷换流器也不断接入电网中。仅通过分布式电源模拟同步发电机已不足以支撑越来越庞大的电网安全稳定运行, 必须从负荷侧入手, 使负荷换流器同样模拟传统同步电机的运行特性, 参与电力系统调频、调压过程, 提高系统的稳定性, 实现源-网-荷的高效运行^[2]。

由于虚拟同步电机技术^[3-6]使换流器模拟传统同步电机特性, 因此对电网天然友好, 受到国内外学者广泛关注。文献[7]提出一种电动汽车快充方案, 为从负荷侧支撑系统稳定提供了一种思路, 但电网的波动对负荷如何影响没有介绍。文献[8]提出一种能量路由器电路, 由于主动降低负荷电压, 损害了负荷侧的利益。文献[9]提出一种基于虚拟同步电动机技术的变频器控制策略, 能够使变频器模拟虚拟同步电动机的特性, 但其控制参数如何设计没有阐述。文献[10-13]介绍了几种传统负荷换流器控制方法, 但是当电网电压波动时, 负荷无

功不变, 不支撑电网的电压稳定。为此, 文中针对负荷换流器, 提出一种基于虚拟同步电机的负荷换流器控制模型及控制参数设计方法, 为从负荷侧解决电网稳定问题提供思路。搭建了负荷虚拟同步电机的 Matlab/Simulink 仿真模型并进行了仿真, 仿真结果验证了所提方法的可行性和有效性。

1 系统结构

负荷虚拟同步电机通过利用虚拟同步电机技术控制负荷换流器来模拟传统同步电机的工作状况, 从而表现出传统同步电机的运行特性。其基本结构如图1所示。

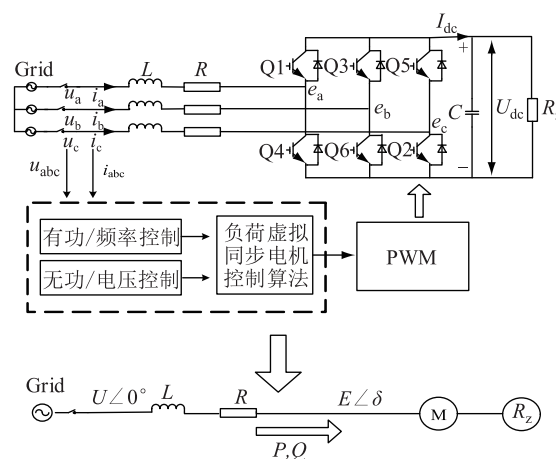


图1 负荷虚拟同步电机的原理

Fig. 1 Schematic diagram of VSM

其中, Q1—Q6 组成三相整流桥, R_z 为负荷换流器内阻。控制部分主要由功率控制和负荷虚拟同步电机算法组成, 功率控制包含有功-频率控制、无功-电压控制。负荷虚拟同步电机将测得的端电压

收稿日期: 2017-09-05; 修回日期: 2017-10-08

基金项目: 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金资助项目(XTCX201713)

u_{abc} 和端电流 i_{abc} 经过功率控制环节,送入负荷虚拟同步电机控制算法中,得到相应的控制信号。将控制信号通过脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 送回换流器中,使得直流侧输出电压为设定值。

2 控制策略

负荷虚拟同步电机的数学模型可以用经典二阶模型来进行描述^[14]。与电源侧虚拟同步发电机不同的地方在于,负荷虚拟同步电机的电流方向与电源侧虚拟同步发电机电流方向相反,即由交流电网侧流向直流侧。

设定负荷虚拟同步电机的极对数为 1,其机械方程:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_m - T_d = T_e - T_m - D(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

式中: δ 为负荷虚拟同步电机的功角; ω 为负荷虚拟同步电机的角频率; D 为阻尼系数; J 为负荷虚拟同步电机的转动惯量; T_m 、 T_e 和 T_d 分别为负荷虚拟同步电机的机械转矩、电磁转矩和阻尼转矩; ω_0 为电网额定角频率。

其电磁方程:

$$u_{abc} = e_{abc} + L \frac{di_{abc}}{dt} + Ri_{abc} \quad (3)$$

式中: e_{abc} 为负荷虚拟同步电机的内电势; u_{abc} 为负荷虚拟同步电机的端电压; L 和 R 分别等效为负荷虚拟同步电机的定子电感和定子绕组,分别对应交流接口处的滤波电感及其寄生电阻。

负荷虚拟同步电机的有功-频率控制框图如图 2 所示。在有功-频率控制中,负荷侧测得的直流电压 U_{dc} 与直流参考电压 U_{dcref} 相比较后,进行 PI 控制,然后将 PI 控制器的输出结果与直流侧电压参考值相乘,可以得到有功功率的参考值 P_{ref} 。

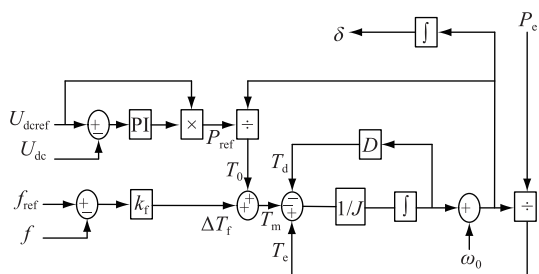


图 2 负荷虚拟同步电机有功和频率控制

Fig.2 Active and frequency control diagram of VSM

负荷虚拟同步电机的机械转矩 T_m 由额定转矩指令 T_0 和频率调节的部分 ΔT_f 组成,可表示为:

$$T_m = T_0 + \Delta T_f \quad (4)$$

式(4)中额定转矩指令 $T_0 = P_{ref}/\omega$, 频率调节的部分 $\Delta T_f = k_f(f - f_{ref})$ 。其中, k_f 为频率调节系数; f 为负荷虚拟同步电机的频率; f_{ref} 为电网额定频率。

负荷虚拟同步电机的电磁功率由内电势 e_{abc} 和端电流 i_{abc} 得出,表示为:

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (5)$$

电磁转矩由电磁功率与负荷虚拟同步电机的角频率得到,表示为:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} \quad (6)$$

负荷虚拟同步电机无功-电压控制框图如图 3 所示。

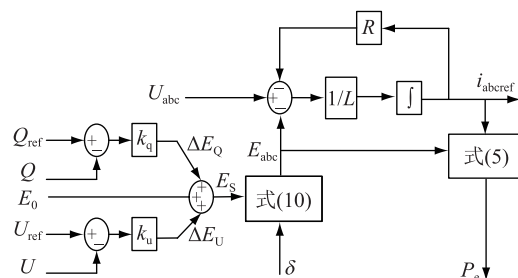


图 3 负荷虚拟同步电机无功和电压控制

Fig.3 Reactive power and voltage control diagram of VSM

在无功-电压控制中,负荷虚拟同步电机的无功功率可得:

$$Q = \sqrt{i_a(u_b - u_c) + i_b(i_a - i_c) + i_c(u_a - u_b)} \quad (7)$$

负荷虚拟同步电机的内电势指令由电机的空载电势 E_0 、无功调节的部分 ΔE_Q 以及电压调节的部分 ΔE_U 组成,可以表示为:

$$E_s = \Delta E_Q + E_0 + \Delta E_U \quad (8)$$

其中无功调节的部分 ΔE_Q 和电压调节的部分 ΔE_U 分别表示为:

$$\begin{cases} \Delta E_Q = k_q(Q_{ref} - Q) \\ \Delta E_U = k_u(U_{ref} - U) \end{cases} \quad (9)$$

式中: k_q 、 k_u 分别为无功、电压调节系数; Q_{ref} 和 Q 分别为交流接口处的无功指令和瞬时无功; U_{ref} 和 U 分别为负荷虚拟同步电机的端电压指令以及真实值。可以得到虚拟同步电机的虚拟电势矢量:

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} E_s \sin(\delta) \\ E_s \sin(\delta - 2\pi/3) \\ E_s \sin(\delta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

可以看出,图2、图3所示的控制框图中,包含了传统同步电机的机械方程和电磁方程。因此,该控制可将负荷换流器模拟成传统同步电机来控制,构成了负荷虚拟同步电机。

3 小信号模型

负荷虚拟同步电机与电网交换的功率可以表示为:

$$\begin{cases} P = \frac{3U_g E}{X} \sin\delta \\ Q = \frac{3U_g}{X} (U_g - E \cos\delta) \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_g 为交流电网相电压; E 为负荷换流器交流侧相电压; δ 为 U_g 和 E 的相位差; X 为滤波电路总电抗。

当负荷虚拟同步电机在稳态工作状态下发生小扰动时,可认为 $\sin\delta \approx \delta$,可得到电磁功率小信号表达式:

$$\Delta P_e = \frac{3E_0 U_g}{X} \delta \quad (12)$$

由式(12)及图(2)可得到有功控制环的小信号控制框图如图4所示。

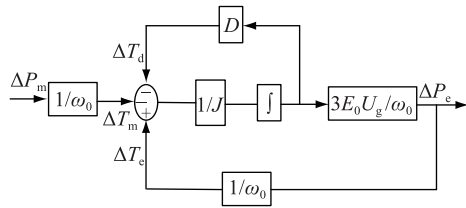


图4 有功控制环的小信号控制

Fig.4 Small signal control diagram of active control

根据功率守恒原则,当忽略负荷换流器内部功率损耗时,换流器直流侧功率应与交流侧功率相等。再根据基尔霍夫电流定律,则有:

$$\begin{cases} EI = U_{dc} I_{dc} \\ I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_z} \end{cases} \quad (13)$$

又由负荷虚拟同步电机的电磁功率 $P_e = EI$,可得电磁功率 P_e 与直流侧电压 U_{dc} 的小信号模型:

$$\begin{cases} \Delta P_e = U_{dc0} C \frac{d\Delta U_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc0} \Delta U_{dc}}{R_z} \\ \frac{\Delta U_{dc}}{\Delta P_e} = \frac{R_z / U_{dc0}}{1 + R_z C s} \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)和图2可得到负荷虚拟同步电机的小信号控制框图,如图5所示。

由图5所示的小信号模型,可得负荷虚拟同步

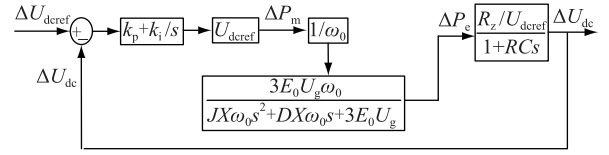


图5 负荷虚拟同步电机小信号控制

Fig.5 Small signal control diagram of VSM

电机的开环传递函数为:

$$G(s) = U_{dc0} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \frac{1}{\omega_0} \frac{3E_0 U_g \omega_0}{JX\omega_0 s^2 + DX\omega_0 s + 3E_0 U_g} \frac{1}{1 + RCs} \frac{R_z}{U_{dc0}} = \frac{R_z (k_p s + k_i) 3E_0 U_g}{s (JX\omega_0 s^2 + DX\omega_0 s + 3E_0 U_g) (1 + RCs)} \quad (15)$$

4 控制参数设计

可将式(15)所示的负荷虚拟同步电机的开环传递函数化简为:

$$G(s) = \frac{R(k_p s + k_i) \omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi \omega_n^2 s + \omega_n^2) (1 + RCs)} \quad (16)$$

其中, $\omega_n^2 / (s^2 + 2\xi \omega_n^2 s + \omega_n^2) = 3E_0 U_g / (JX\omega_0 s^2 + DX\omega_0 s + 3E_0 U_g)$ 。 ω_n 和 ξ 分别为二阶惯性环节的自然振荡频率和阻尼比。

自然振荡频率 ω_n 和阻尼比 ξ 分别为:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{3E_0 U_g}{JX\omega_0}} \\ \xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\omega_0 X}{3E_0 U_g J}} \end{cases} \quad (17)$$

可得,

$$\begin{cases} J = \frac{3E_0 U_g}{X\omega_0 \omega_n^2} \\ D = 2\xi \sqrt{\frac{3E_0 U_g J}{\omega_0 X}} \end{cases} \quad (18)$$

为了兼顾系统的阻尼效果和动态响应性能,工程上阻尼比 ξ 一般取在最佳阻尼比左右,文中取阻尼比 $\xi = 0.707$ 。

幅频特性曲线的低频段负斜率越大,位置越高,则闭环系统在满足稳定条件时的稳态精度越好。并且,高频段的特性分贝值越低,系统的抗干扰能力越强。因此,为了保证负荷虚拟同步电机的稳定性,开环传递函数的截止频率 ω_c 应该处于幅频特性曲线的-20 dB斜率段^[15]。图6给出了负荷虚拟同步电机的开环幅频特性曲线,其中 $1/R_z C < k_i/k_p < \omega_c < \omega_n$ 。

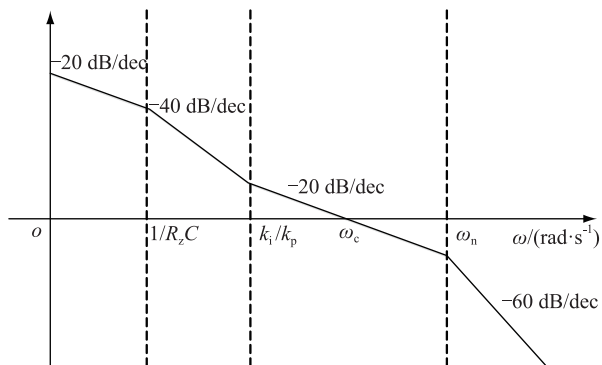


图6 负荷虚拟同步电机开环幅频特性曲线

Fig.6 Open-loop amplitude-frequency characteristic curve of VSM

由图6可知,当 J 取值过大时,二阶振荡环节的自然振荡频率 ω_n 会和一阶微分环节的转折频率 k_i/k_p 十分接近,从而开环截止频率 ω_c 会十分接近一阶微分环节的转折频率,这样就会导致系统的相角稳定裕度大幅度降低,不利于系统的稳定。为了减小谐波对二阶振荡环节的影响,截止频率 ω_c 应该小于2倍工频,文中取 $\omega_c = 200 \text{ rad/s}$ 。由于负荷虚拟同步电机的二阶自然振荡频率 ω_n 需要满足 $\omega_c < \omega_n$ 的条件,可取 $\omega_n = 585 \text{ rad/s}$ 。

在截止频率 ω_c 处,系统开环传递函数幅频特性

$$A(\omega_c) = \frac{R_z k_i \sqrt{(1 + h_v^2)}}{\sqrt{1 + R_z^2 C^2 \omega_c^2} \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega_c}{\omega_n}\right)^2}} = 1 \quad (19)$$

其中 $h_v = \omega_c / (k_i/k_p)$,表征一阶微分环节的转折频率 k_i/k_p 与截止频率 ω_c 的相对大小。

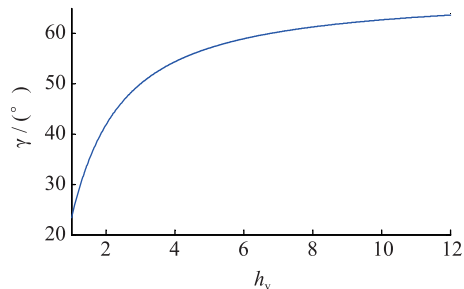
此处,系统相角裕度 γ 表示为:

$$\gamma = 90^\circ + \arctan(h_v) - \arctan\left(\frac{2\xi\omega_c/\omega_n}{1 - \omega_c^2/\omega_n^2}\right) - \arctan(R_z C \omega_c) \quad (20)$$

为了兼顾系统的稳定性和快速性,系统的相角裕度 γ 通常要满足 $30^\circ \leq \gamma \leq 70^\circ$ ^[16-17]。图7给出了 h_v 与系统相角裕度 γ 的关系曲线。由图7可知,当 h_v 取值过小时, h_v 的微小变化即可对系统的相角裕度产生过于明显的变化。当 h_v 取值过大时, h_v 的变化不能有效的影响系统相角裕度。文中取 $h_v = 5$,此时 h_v 的变化对系统相角裕度的影响适中,易于控制。

因此,可得到控制参数的计算表达式如下:

$$k_p = k_i h_v / \omega_c \quad (21)$$

图7 h_v 与系统的相角裕度 γ 关系曲线Fig.7 Relationship graph between h_v and angle margin γ

$$k_i = \frac{\sqrt{1 + R_z^2 C^2 \omega_c^2} \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega_c}{\omega_n}\right)^2}}{R_z \sqrt{(1 + h_v^2)}} \quad (22)$$

5 仿真

5.1 仿真算例

为验证文中所提出的基于虚拟同步电机的负荷换流器小信号模型及控制参数设计方法的可行性和有效性,在Matlab/Simulink中搭建了图1所示结构的模型进行仿真验证。负荷虚拟同步电机控制方法的参数如表1所示。

表1 负荷虚拟同步电机系统参数

Tab.1 Parameters of VSM

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|---------------------|------|------------------------|---------|
| 交流电网电压 U_g/V | 380 | 直流输出电压设定值 U_{dref}/V | 600 |
| 滤波电路电感 L/mH | 3 | 直流侧电容 C/mF | 2.5 |
| 滤波电路寄生电阻 R/Ω | 0.2 | 直流侧等效内阻 R_z/Ω | 20 |
| 电网额定频率 f_{ref}/Hz | 50 | 频率调节系数 k_f | -0.6 |
| 电机空载电势 E_0/V | 310 | 无功指令 Q_{ref}/var | 0 |
| 电压调节系数 k_v | 0.43 | 无功调节系数 k_{qi} | 0.000 1 |

由上面已知参数,根据式(18)可计算负荷虚拟同步电机的转动惯量 $J = 0.001 7$,阻尼系数 $D = 6$;再根据式(21)可计算的有功控制环节PI控制器的比例系数 $k_p = 0.4$, $k_i = 16$ 。由上面计算所得参数,结合负荷虚拟同步电机的小信号模型,绘出负荷虚拟同步电机开环传递函数的Bode图如图8所示,可知系统的截止频率 ω_c 为32 Hz/s,自然振荡频率 ω_n 为93 Hz/s,相角稳定裕度为 58° ,满足要求。因此,文中所提小信号模型及用于设计控制参数的方法是正确的、有效的。

IGBT的开关频率选为10 kHz。下面分4种工况进行仿真。

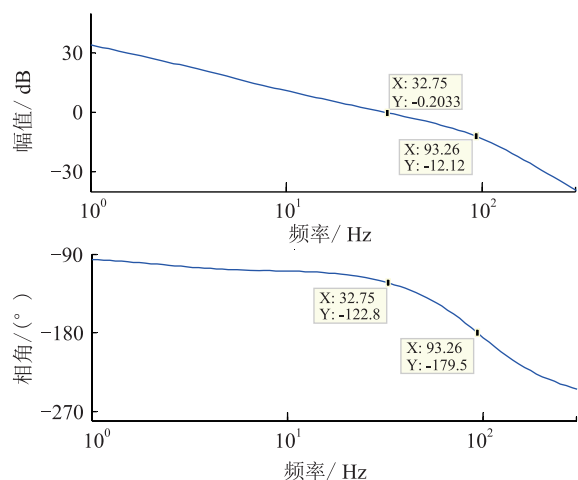


图8 负荷虚拟同步电机开环传递函数 Bode 图

Fig.8 Open-loop transfer function Bode diagram of VSM

工况 1:初始稳定运行后,0.3 s 时,网侧电压受到扰动出现电压跌落,跌落了 5%;0.5 s 时,网侧电压回到正常状态;0.7 s 时,网侧电压受到扰动出现电压上升,上升了 5%;0.9 s 时,网侧电压回到正常状态。

工况 2:初始稳定运行后,0.3 s 时,网侧电压受到扰动,频率上升了 0.5 Hz;0.5 s 时,网侧电压频率回到正常运行状态。

工况 3:初始稳定运行后,0.3 s 时,负荷侧突然有内阻为 30 Ω 的阻性负载加在负荷虚拟电机负荷侧;0.5 s 时,负荷侧又有内阻为 20 Ω 的阻性负载加在负荷虚拟电机负荷侧;0.7 s 时,内阻为 30 Ω 的阻性负载断开。

工况 4:初始稳定运行后,0.3 s 时,网侧电压发生单相故障,A 相电压下降了 5%;0.5 s 时,A 相电压回到正常状态;0.7 s 时,A 相电压上升 5%;0.9 s 时,A 相电压回到正常状态。

5.2 仿真结果

图 9 为工况 1 的仿真波形。图 9(a)为负荷虚拟同步电机直流侧电压波形。开机后,负荷直流侧电压稳定在 600 V。在网侧电压出现波动后,直流侧电压最终总能稳定在 600 V。图 9(b)为负荷虚拟同步电机无功功率与其他传统控制的无功功率的波形。可见,当电网电压下降时,负荷虚拟同步电机的无功降低,当电网电压上升时,负荷虚拟同步电机的无功增大,支撑电网的电压稳定。

图 10 为工况 2 时负荷虚拟同步电机的仿真波形。图 10(a)为负荷虚拟同步电机直流侧电压波形。频率的变化意味着大扰动的发生,同时,频率的变化会对电压产生较大影响。由图 10(a)可知,

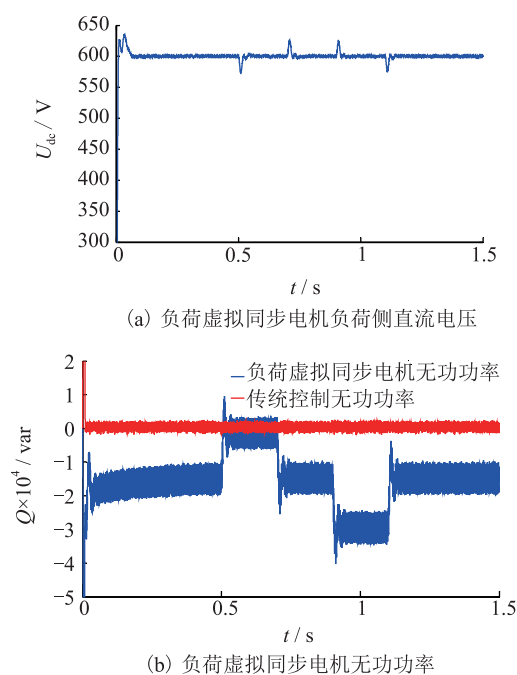


图9 工况 1 的仿真波形

Fig.9 Simulation waveform of case 1

系统的频率发生变化时,负荷虚拟同步电机的直流侧电压依旧可以稳定在设定值。图 10(b)为负荷虚拟同步电机频率波形。由图 10(b)可知,负荷虚拟同步电机无需锁相环,即可准确跟踪网侧电压频率。

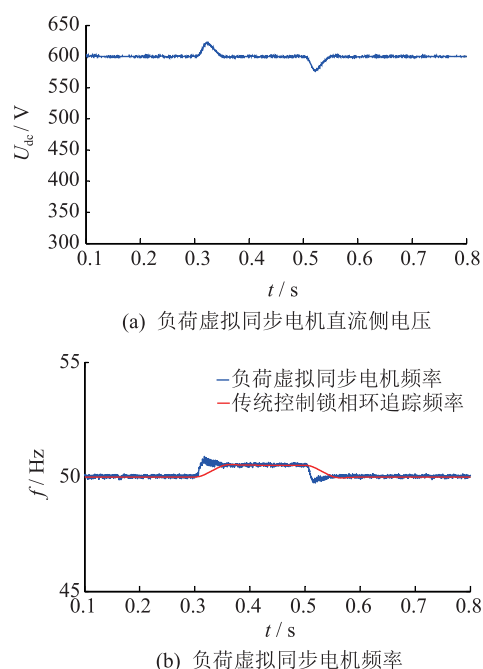


图 10 工况 2 的仿真波形

Fig.10 Simulation waveform of case 2

图 11 为工况 3 的仿真波形。图 11(a)为负荷虚拟同步电机有功功率波形,可知突加的并联负载使负荷虚拟同步电机有功功率增大,这与理论相符。图 11(b)为负荷虚拟同步电机无功功率波形,

直流侧负载变化时,负荷虚拟同步电机无功功率也跟着变化,对电网电压稳定有一定的支撑作用。图 11(c)为负荷虚拟同步电机频率波形,由于突加的负载阻值与原负载阻值接近,扰动较大。从图 11(c)中可知,大扰动负载的加入或切除,负荷虚拟同步电机的有功功率急剧变化,但频率经过很小的波动过程,总能回到电网工频,支撑了电网的稳定。

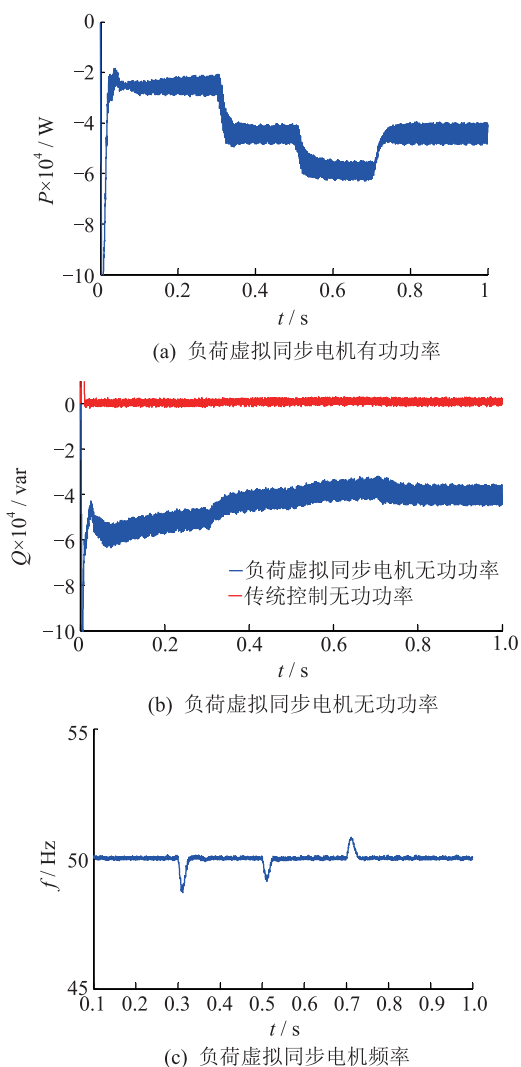


图 11 工况 3 的仿真波形

Fig.11 Simulation waveform of case 3

图 12 给出了工况 4 的仿真波形。

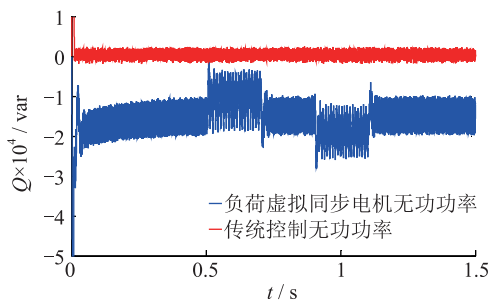
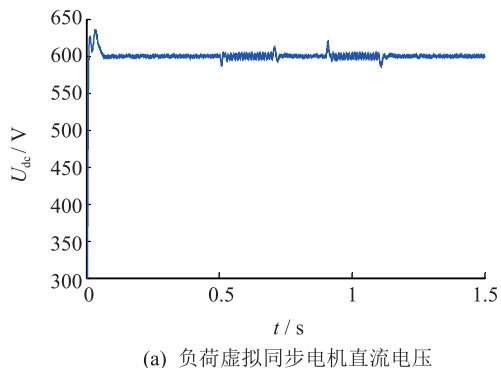


图 12 工况 4 的仿真波形

Fig.12 Simulation waveform of case 4

图 12(a)为负荷虚拟同步电机直流侧电压波形。开机后,负荷直流侧电压稳定在 600 V。在网侧出现单相电压波动后,直流侧电压总能稳定在 600 V。图 12(b)为负荷虚拟同步电机无功功率与其他传统控制的无功功率的波形。与工况 1 类似,负荷虚拟同步电机可支撑电网的电压稳定。

6 结论

文中基于虚拟同步电机技术,提出一种负荷换流器控制小信号模型及控制参数设计方法,用以模拟同步电机的特性。通过 Matlab/Simulink 搭建模型并进行仿真,仿真结果表明了该方法的正确性和有效性。因此,可以得到以下结论:

(1) 所提方法建立了负荷虚拟同步电机的小信号模型,分析了控制参数对系统稳定性的影响程度,可根据实际要求自行设计参数大小。

(2) 所提方法不需要引入锁相环即可准确跟踪电网的电压频率。

(3) 所提方法实现了负荷侧支撑电网稳定的功能,对设计负荷侧控制器来支撑电网稳定提供了一定思路。

参考文献:

- [1] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008. ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 吕志鹏. 虚拟同步机技术构建“源-网-荷”友好互动新模式[J]. 供用电, 2017, 34(2): 32-34. LYU Zhipeng. New pattern of source-grid-load friendly interaction based on virtual synchronous machine technology[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(2): 32-34.
- [3] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [4] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized

- synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2):617-630.
- [5] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [6] 李旭, 丁勇, 李勇, 等. 虚拟同步发电机的相角控制方法 [J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 43-46.
LI Xu, DING Yong, LI Yong, et al. Phase angle control method of virtual synchronous generator [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 43-46.
- [7] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287-4294.
LYU Zhipeng, LIANG Ying, ZENG Zheng, et al. Virtual synchronous motor based control scheme of fast charger for electric vehicle application [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4287-4294.
- [8] 盛万兴, 刘海涛, 曾正, 等. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3541-3550.
SHENG Wanxing, LIU Haitao, ZENG Zheng, et al. An energy hub based on virtual-machine control [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3541-3550.
- [9] 范红, 董伟杰, 白晓民, 等. 基于虚拟同步电动机技术的变频器控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4446-4453.
FAN Hong, DONG Weijie, BAI Xiaojie, et al. A novel frequency-converter control strategy based on virtual synchronous motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4446-4453.
- [10] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于PI调节器和电容电流反馈有源阻尼的LCL型并网逆变器闭环参数设计 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142.
BAO Chenlei, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 133-142.
- [11] 杨达亮, 卢子广, 杭乃善, 等. 三相电压型PWM整流器准定频直接功率控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 66-73.
YANG Daliang, LU Ziguang, HANG Naishan, et al. Novel quasi direct power control for three-phase voltage-source PWM rectifiers with a fixed switching frequency [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 66-73.
- [12] 李子欣, 李耀华, 王平, 等. PWM整流器在静止坐标系下的准直接功率控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 47-54.
LI Zixin, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Novel quasi direct power control method for PWM rectifier in stationary frame [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 47-54.
- [13] 韩华春, 丁昊, 黄地, 等. 面向主动配电网的电动汽车充放电功率控制技术 [J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 8-13.
HAN Huachun, DING Hao, HUANG Di, et al. Electric vehicle power control strategy for active distribution network electric power engineering technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 8-13.
- [14] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yixin. Theory and analysis of dynamic power system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [15] 胡寿松. 自动控制原理5版 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
HU Shousong. Automation control 5th ed [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [16] 高丙团, 夏超鹏, 张磊, 等. 基于虚拟同步电机技术的VSC-HVDC整流侧建模及参数设计 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 534-543.
GAO Bingtuan, XIA Chaopeng, ZHANG Lei, et al. Modeling and parameters design for rectifier side of VSC-HVDC based on virtual synchronous machine technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 534-543.
- [17] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.

作者简介:



何光辉

何光辉 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制 (E-mail: 347009832@qq.com);

张仰飞 (1969—), 男, 博士, 教授, 研究生导师, 从事电力系统运行与控制方面研究;

陈光宇 (1980—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制。

Design and Implementation of Upgrading Function for Substation Telecontrol Data Model

ZHOU Yifan, YAN Youjun, QI Zhong, PENG Chuang
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: With the development of intelligent substation technology, the transition from traditional substation to intelligent substation will continue for a long time. Aiming at the shortcomings of manual maintenance of the remote device model as heavy workload and error-prone, the characteristics of the information structure and object model of the telecontrol device are analyzed. A remote configuration upgrade conversion scheme is proposed. Combined with the specific application examples, the program design and development process of the tool software are introduced, the modules that make up the tool are put forward, and their functions are described in detail. Compared with the traditional way, the scheme can significantly reduce the difficulty of substation remote transformation and improve the efficiency of project implementation.

Key words: object model; configuration tool; communication gateway; upgrade conversion

(编辑 陈娜)

(上接第 85 页)

Modeling and Parameter Design of Load Converter Based on Virtual Synchronous Motor

HE Guanghui¹, ZHANG Yangfei¹, CHEN Guangyu¹, YUAN Yubo², ZHANG Chenyu², SHI Mingming²
(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the continuous development of power electronics technology, the load converters are constantly being connected to the power grid. So the power grid is progressively developing into a low inertia and less damping network, and the issues of power grid's security and stability are becoming increasingly prominent. Under the traditional control of converter, the load is difficult to participate effectively in the dynamic regulation of the power grid. Virtual synchronous motor technology can provide inertial support for the system so, it attracts people's attention. This paper introduces the principle of the load virtual synchronous motor, and establishes the small signal model of the load virtual synchronous motor, and it also gives a control parameter design method of the load virtual synchronous motor. This method can balance the stability and dynamic performance of the system. The Matlab / Simulink simulation results show that the correctness of the small signal model and the effectiveness of the design method which proves that it can provide some support for the stability of the power grid.

Key words: virtual synchronous motor; small signal model; parameter design; stability

(编辑 杨卫星)

(上接第 102 页)

Research on Oscillation Characteristics and Out-of-step Separation System Scheme for Yunnan Power Grid After Asynchronous Interconnection

XIAO Youqiang¹, YU Qiuyang², CHEN Yixuan¹, FANG Shengwen²

(1. Yunnan Power Grid Corporation Plan Center, Kunming 650011, China; 2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Yunnan Power Grid and China Southern Power Grid have become an asynchronous network. There is a new change in the out-of-step oscillation characteristics of the grid. In this paper, four kinds of multiple serious faults are studied which are under the typical mode of Yunnan Power Grid. The out-of-step oscillation sections can be divided into two types, one is the parallel section and another is the long chain section. Yunnan Power Grid is currently equipped with distributed out-of-step devices, which is not ideal for the out-of-step determination and separation for these two types of out-of-step sections. A method is presented to design an out-of-step system based on the $U\cos\varphi$ criterion and the voltage phase difference criterion. Three out-of-step systems are designed respectively for northwestern Yunnan, northeastern Yunnan and southwestern Yunnan. The strategies of the out-of-step systems are also developed.

Key words: out-of-step oscillation; oscillation center; out-of-step separation; separation system

(编辑 钱悦)