

基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略

丁 明, 杨向真, 苏建徽

(合肥工业大学教育部光伏系统工程研究中心, 安徽省合肥市 230009)

摘要: 提出了一种基于同步发电机机电暂态模型的新型微电网逆变电源(称为虚拟同步发电机)。功率控制器和电压频率控制器使该逆变电源具有功率控制和调频调压双重功能,而且在微电网发生故障时仍能作为不间断电源向重要负荷供电,预并列单元则使得该逆变电源能够可靠并联到微电网上;当微电网连接大电网运行时,系统频率由大电网决定,各虚拟同步发电机可采用功率控制策略使其按照功率调度指令输出功率。当微电网孤岛运行时,必须有逆变单元采用电压频率控制策略,提供微电网的电压参考;微电网中,同等容量的逆变电源还可以任意替换,易于模块化、标准化生产,增加了微电网控制的灵活性,提高了系统的可靠性。所提出的控制策略已在 MATLAB/Simulink 上得到验证。

关键词: 微电网; 虚拟同步发电机; 调频调压; 功率控制; 预并列单元

中图分类号: TM614; TM712; TM727.2

0 引言

微电网是由负荷和多个微源组成的集合系统,具有联网和孤岛 2 种工作模式,是分布式发电领域非常活跃的分支。目前,由微电网中央控制器和单元控制器组成的集中控制型微电网的研究较多^[1-4],该结构与传统电力系统类似,但微电网是以逆变电源为主的小型电网,其中,具有储能单元的逆变电源起着维持系统电压稳定、频率稳定和功率平衡的重要作用,其控制策略的研究是微电网的关键技术之一^[5],也是本文研究的主要内容。

微电网孤岛运行时,需要下面 2 种功能的逆变电源:①作为可调度单元,只根据功率调度指令输出功率;②作为调频调压单元,提供发电单元与负荷之间的瞬时功率偏差,维持微电网频率和电压的稳定^[5-7];微电网连接大电网运行时,系统频率由大电网决定。微电网逆变电源只需要按照指定功率运行^[8]。文献[4]指出在逆变电源直流侧加装储能装置,可以将前级能源为风能、太阳能等不可调度的分布式发电单元转化为可调度单元。本文主要研究配置有储能装置的逆变电源控制策略,如果这些逆变电源都具有功率控制和调频调压双重功能,且可以根据运行模式或其他条件切换控制策略,改变它在微电网中的角色,将会大大增加微电网控制的灵活

性。当微电网故障时,如果该逆变电源能够继续不间断地向重要负荷供电,将会进一步提高微电网供电可靠性。这种设计也有利于逆变电源模块化和标准化生产,有重要的现实意义。目前国内外相关文献还较少^[8-9]。

本文基于上述思想提出了一种新型微电网逆变电源,由该逆变电源组成的微电网既能连接大电网运行,又能实现孤岛运行时频率的无差控制。

1 虚拟同步发电机的基本结构

大型电力系统中,为了维持系统频率稳定和功率平衡,同步发电机组按照功能可以分为非调频机组和调频机组。非调频机组正常运行时按预先给定的负荷曲线发电,并配备调速器参与动态频率调节;调频机组主要利用同步器进行系统频率调整^[10]。如果能够将具有储能装置的微电网逆变电源的数学模型等效为同步发电机模型,再借鉴调速器和同步器的工作原理设计逆变电源的控制器,电力系统中相关控制策略、理论分析方法就可以方便地引入由该新型逆变电源组成的微电网中。据此,本文提出了图 1 所示的新型微电网逆变电源(称为虚拟同步发电机(VSG)),其主电路为三相全桥逆变电路, L_{fi} 和 C_{fi} ($i = a, b, c$)分别为滤波电感和电容, L_i 用来实现功率传输, r_{Li} 是滤波电感、开关器件、线路等元件的等效电阻之和,并假设直流侧为电压恒定的储能装置,且允许能量双向流动。VSG 算法模块采用同步发电机的机电暂态数学模型,有效模拟同步发电机的转子机械特性和定子电气特性;功率控制器(简

收稿日期: 2008-12-02; 修回日期: 2009-01-20。

国家自然科学基金资助项目(50777015, 50837001); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA05Z240)。

称 PQ 控制器)和电压频率控制器(简称 Vf 控制器)分别实现按功率调度指令发电和调频调压 2 种功能,预同步单元则确保 VSG 满足并网条件后闭合

接触器 KM,模式选择信号用来选择是 PQ 控制模块、Vf 控制模块还是预同步控制模块有效。

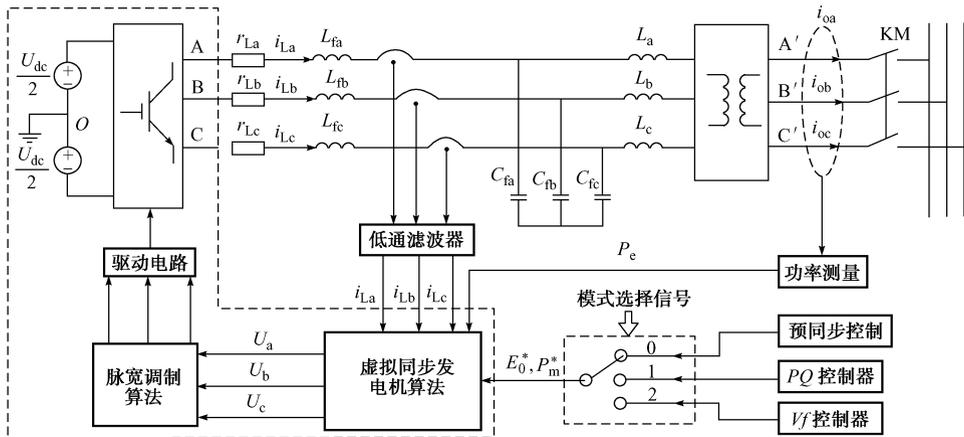


图 1 VSG 的原理示意图
Fig. 1 Theory diagram of virtual synchronous generator

VSG 的算法如下式所示^[11]:

$$\begin{cases} T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D\Delta\omega = J \frac{d\Delta\omega}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \dot{E}_{oi} = \dot{U}_i + \dot{I}_i(r_a + jx_t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_m 和 T_e 分别为机械转矩和电磁转矩; P_m 和 P_e 分别为机械功率和电磁功率; D 为定常阻尼系数; $\Delta\omega$ 为电角速度差, $\Delta\omega = \omega - \omega_b$, ω_b 和 ω 分别为额定电角速度和实际电角速度, 令极对数为 1, 则机械角速度 $\omega_m = \omega$; θ 为电角度; \dot{E}_{oi} , \dot{U}_i , \dot{I}_i 分别为 i 相感应电动势、定子端电压和定子电流; r_a 和 x_t 分别为定子电枢电阻和同步电抗。

式(1)算法中的机械转矩、转动惯量、定子电枢电阻、同步电抗、电角速度以及感应电动势等参数与同步发电机相应参数的物理意义相同, 并根据系统功率的大小, 选择功率相匹配的实际同步电机设计参数作为该算法的参数, 利用单片机、DSP 等数字装置可以很容易实现, 而且设置更加灵活。为了方便起见, 本文仍然沿用以前的参数名称。

图 1 中, 将电感电流经过低通滤波器后反馈到 VSG 算法模块中, 使 $i_i = i_{Li}$, 并将由定子电压方程得到的 u_i 作为逆变电源的调制波, 根据面积等效原则^[12], 逆变桥输出电压 u_{jo} ($j = A, B, C$) 中的基波电压等于调制波 u_i , 因此, 图 1 虚线框内的模型可以等效成电枢电阻为 r_a 、同步电抗为 x_t 的机电暂态同步发电机模型。由于滤波器主要用于滤除高次谐波分

量, 并不改变基波分量的特性, 所以机电暂态模型所反映的转子动态特性与同步发电机相同, 完全可以用同步发电机的物理模型进行分析。

2 控制器设计

本文将 VSG 设计为具有功率控制和调频调压双重功能的可控电压源, 以便在微电网发生故障时, 仍能作为不间断电源向重要负荷供电。所设计的控制器如图 2 所示。

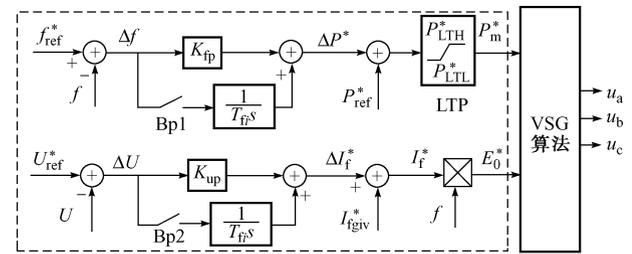


图 2 PQ 控制和 Vf 控制框图
Fig. 2 PQ control and Vf control scheme

2.1 Vf 控制

Vf 控制的 VSG 主要负责调节微电网孤岛运行时系统的频率, 维持节点电压的稳定, 输出的有功功率和无功功率则由负荷决定, 其接入点的节点特性为 Vf 节点。

1) 频率控制

图 2 中第 1 个子控制器中, 闭合开关 Bp1, 利用 PI 调节器可以实现频率的无差控制。 P_{LTH}^* 和 P_{LTL}^* 分别为 VSG 允许输出的最大功率和允许吸收的最大功率; P_{ref}^* 为机械输入功率的前馈值, 应根据需要

灵活设置; P_m^* 为 VSG 算法模块中的机械输入功率。当输入功率 $P_m^* = P_{LTH}^*$, 而频率仍然小于给定频率时, 限幅器 LTP 将限制输入功率的大小, 使逆变电源运行在最大功率点, 此时微电网必须依靠其他发电单元或者切除部分负荷来维持频率在允许范围内; 当 $P_m^* = P_{LTL}^*$, 而频率仍大于给定频率时, 情况与上述类似。

2) 电压控制

励磁控制系统通过调节励磁电流, 改变感应电动势的大小, 维持机端电压在允许范围内。本文借鉴同步发电机励磁控制系统的基本原理设计了 VSG 电压控制器, 如图 2 中第 2 个子控制器所示。 U_{ref}^* 和 U 分别为端电压给定值和实际值; I_{f0}^* 为空载励磁电流, 其物理意义是建立空载感应电动势, 确保 VSG 正常开机。闭合开关 Bp2, 电压偏差 ΔU 输入到 PI 调节器后调节励磁电流 I_f^* , 改变感应电动势的大小, 实现端电压的无差控制。本控制器中励磁电流和感应电动势的调节范围更宽, 调节速度更快, 有利于系统的稳定。

在微电网中, Vf 控制的 VSG 负责整个系统频率的调整, 该逆变电源必须拥有足够的调整容量及调整范围, 且具有与负荷变化相适应的调整速度, 需要根据微电网容量、经济性、发电单元调节速度等条件合理选择。

2.2 PQ 控制

PQ 控制策略使 VSG 输出的有功功率和无功功率可控, 在微电网中, 该逆变电源接入点的节点特性是 PQ 节点。

1) 有功功率控制

首先利用物理模型阐述 VSG 连接微电网时功率交换的原理。假定微电网三相电压的合成空间矢量以同步电角速度 ω_b 旋转, VSG 接入微电网后, 其定子三相电压的合成空间矢量也以角速度 ω_b 旋转, 若机械转矩与电磁转矩不平衡, 转子角速度 ω 的增大或者减小将改变感应电动势与定子电压之间的功角, 从而改变输出电磁功率的大小, 直到转子最终以 ω_b 旋转, 输入机械功率与输出电磁功率平衡。

电力系统中, 由于调频机组涉及到发电机组的燃烧系统和上层自动发电控制系统, 调节速度较慢, 为了适应波动周期短、变化幅度小的负荷, 所有非调频机组均加装了调节速度较快的调速器, 以缓解系统频率的变化^[13]。微电网中, 如果调频单元响应速度较慢或者微电网采用类似电力系统自动发电控制方式时, 为了适应波动周期短、变化幅度小的负荷, 本文也在 VSG 中加装了频率有差调节器, 断开图 2 中的开关 Bp1, 比例系数 K_p 实质上增大了系统的等

效阻尼系数, 缩短了暂态时间, 有利于抑制系统频率的振荡(见附录 A), 从而不仅使 PQ 控制的发电单元参与频率动态调节, 缓解了负荷波动尤其是异常负荷突变时频率的变化, 而且稳态时 Δf 为 0, VSG 仍然按照功率调度指令 P_{ref}^* 输出有功功率。

2) 无功功率控制

若断开开关 Bp2, 则与同步发电机无功调节特性相似^[14](见附录 B), VSG 的端电压与无功电流近似成线性关系, 且随无功负荷的增大而减小, 如图 3 中直线 2 所示。假设 2 台 VSG(inv1 和 inv2) 在公共母线上运行: inv1 为无差调节特性, 如图 3 中直线 1 所示, 输出电压始终维持恒定 U_1 ; inv2 为有差调节特性, 如图 3 中直线 2 所示, 此时母线电压必定为 U_1 并保持不变, inv2 输出的无功电流为 I_{Q2} 。如果改变负荷无功功率, inv1 输出的无功电流将发生变化, 而 inv2 的无功电流仍为 I_{Q2} 。若将 inv2 的输出特性改为直线 3, 其输出的无功电流为 I_{Q1} , 负荷无功功率将在 2 台 VSG 之间重新分配。因此, 当 1 台无差调节特性的 VSG 和多台有差调节特性的 VSG 并联运行时, 移动有差调节特性可以改变无功功率在各台发电机之间的分配。

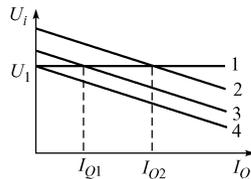


图 3 VSG 调节特性和无功功率分配
Fig. 3 Regulation characteristic and reactive power distribution of VSG

平移调节特性曲线还可以使 VSG 平滑地接入和退出微电网, 如图 3 所示。当 VSG 接入系统时, 令它的调节特性曲线为直线 4, 待并入系统后, 逐步改变调节特性使其输出一定的无功电流; 当 VSG 退出系统时, 可以将调节特性从直线 2 变为直线 3, 最后变为直线 4, 平稳转移负荷。

总之, 通过控制开关 Bp1 和 Bp2 就可以实现 PQ 控制和 Vf 控制的自由切换, 控制非常灵活。微电网连接大电网运行时, 由于电力系统中只能有 1 个平衡节点, VSG 采取 PQ 控制策略; 而微电网孤岛运行时, 必须有逆变单元采取 Vf 控制策略, 以便提供系统的电压参考。

3 预并列单元的设计

预并列单元使 VSG 满足并列条件后进行合闸操作, 不过合闸后拉入同步过程中 VSG 有可能吸收电网功率而工作在电动机状态, 因此, VSG 必须允

许能量双向流动才能满足并网需要。本文设计的VSG预并列单元主要包括频差控制单元、压差控制单元和合闸信号控制单元。压差控制单元可采用上述电压无差闭环控制器,只是端电压给定值 U_{net}^* 是微电网电压有效值。频差控制单元采用锁相环(PLL)技术,如图4所示,将VSG的*i*相输出电压 u_{oi} 和*i*相电网电压 u_{neti} 的相位差送入PI调节器,用来控制输入功率 P_m^* ,通过VSG算法使输出电压的相位跟踪电网电压的相位。合闸信号控制单元用来判断相差、频差、电压差是否满足给定条件,当3个条件都满足时,发出合闸信号。

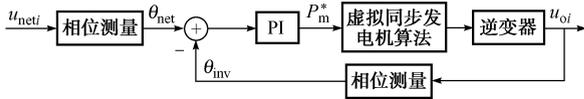


图4 PLL频差控制单元

Fig. 4 PLL frequency deviation control cell

4 VSG的仿真分析

本文利用MATLAB/Simulink仿真软件搭建了如附录C图C1所示的仿真电路。MCC为微电网中央控制器,向inv1和inv2发送模式选择信号和功率调度指令,并向负荷开关和母线开关发送合闸命令。

仿真步骤为:

1)初始阶段,除K5和K7外,其他开关全部闭合,电网单独向所有负荷供电。

2)0.1s时,inv1和inv2各自的预同步单元工作,满足同步条件后,分别闭合K5和K7,由于逆变器输出电压与电网电压之间存在频差、相位差和电压差,闭合时,逆变器与电网之间存在一定的功率交换。联网后,inv1和inv2均采用PQ控制策略,经过短暂的动态过程,2台逆变器均被电网拉入同步。

3)分段改变inv1和inv2的调度功率指令,逐步增加逆变器的输出功率。

4)2.6s后,K1断开,inv1迅速切换为Vf控制策略,提供电压参考,大电网退出时产生较大的不平衡功率,系统频率迅速减小,且inv1和inv2输出电流突然增大,必须尽快切除负荷3以避免频率继续减小以及inv1出现过电流现象,inv1和inv2组成的微电网运行在孤岛状态。

5)由2台逆变电源组成的微电网容量较小,为了避免产生较大的波动,采用分段恢复部分负荷的方法,并不断改变inv2的调度功率和参考电压,但功率调度指令与实际接入负荷并不匹配,inv1输出功率逐步下降,inv2向负荷2供电的同时,也向负荷1提供一部分有功功率。

6)5.6s时,母线3突然故障,K2和K3均跳闸,inv1和inv2分别独立带负载,inv2检测到故障后切换为Vf控制策略,逆变器输出有功功率和无功功率突然发生变化,引起频率和电压波动,功率变化越大,波动将会越大,因此,当允许VSG作为不间断电源向负荷独立供电时,应根据负荷要求合理控制VSG联网时的运行状态,避免切换为不间断电源运行模式时产生较大的频率波动和电压波动而损坏发电设备和负荷。

图5为按照上述仿真步骤得到的仿真结果。

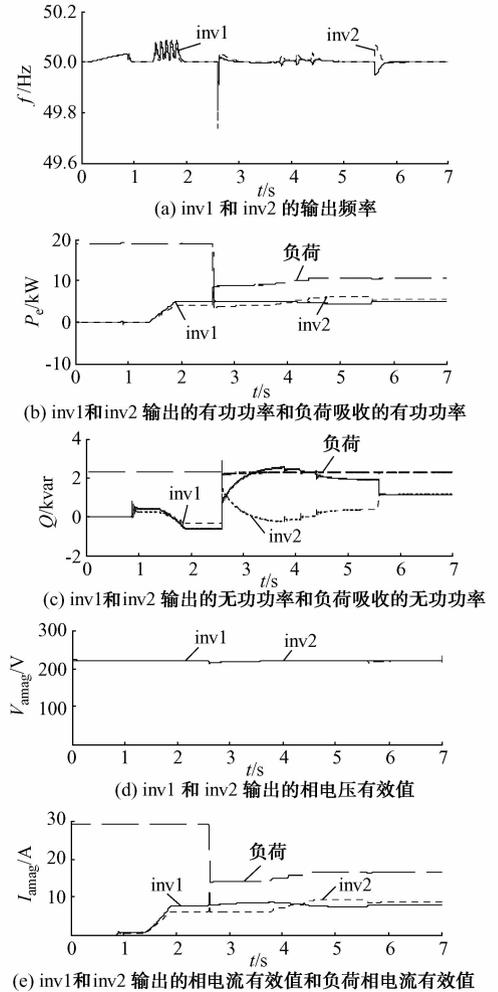


图5 仿真结果

Fig. 5 Result of simulation

5 结语

本文所提出的VSG具有功率控制和调频调压双重功能,可以根据系统需要,灵活改变在微电网中的角色。无论是PQ控制还是Vf控制,VSG都是不依赖于微电网的可控电压源,只要设计合理,微电网故障时,可以继续向重要负荷提供不间断电源,故障恢复后,也可以通过预同步单元的控制重新并网。

与同步发电机相比,VSG的许多参数(如同步电抗、阻尼系统、转动惯量等)不受制造工艺的限制,设计更加灵活,调节更加迅速,合理设置后可以更好地改善系统性能。由于电力电子器件抗过电压、过电流能力较差,还需进一步研究主电路参数和控制器参数的优化设计问题,提高微电网在正常运行、负荷波动、VSG并列以及故障时系统的性能。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] LASSETTER R, AKHIL A, MARNAY C, et al. Integration of distributed energy resources: the CERTS microgrid concept [EB/OL]. [2008-11-01]. <http://certs.lbl.gov/certs-der-pubs.html>.
- [2] FIRESTONE R, MARNAY C. Energy manager design for microgrids[EB/OL]. [2008-11-01]. <http://certs.lbl.gov/certs-der-pubs.html>.
- [3] WANG Zhutian, HUANG Xinhong, JIANG Jin. Design and implementation of a control system for a microgrid involving a fuel cell power module//Proceedings of Electrical Power Conference, October 25-26, 2007, Montreal, Canada; 207-212.
- [4] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIARGYRIOU N, et al. Microgrids management. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.
- [5] KROPOSKI B, LASSETER R, ISE T, et al. Making microgrids work. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 40-53.
- [6] BARSALI S, CERAOLO M, PELACCHI P, et al. Control techniques of dispersed generators to improve the continuity of electricity//Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting; Vol 2, January 27-31, 2002, New York, NY, USA; 789-794.

- [7] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [8] CONTI S, GRECO A M, MESSINA N, et al. Generators control systems in intentionally islanded MV microgrids//Proceedings of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, June 11-13, 2008, Ischia, Italy; 399-405.
- [9] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G, et al. Control strategies for microgrids emergency operation//Proceedings of 2005 International Conference on Future Power Systems, November 16-18, 2005, Amsterdam, Netherlands; 6p.
- [10] 何仰赞,温增银. 电力系统分析:下册. 武汉:华中科技大学出版社,2002:110-126.
- [11] 李光琦. 电力系统暂态分析. 北京:水利电力出版社,1995:154-162.
- [12] 王兆安,黄俊. 电力电子技术. 北京:机械工业出版社,2005:150-152.
- [13] 刘维烈. 电力系统调频与自动发电控制. 北京:中国电力出版社,2006:28-73.
- [14] 孙莹,王葵. 电力系统自动化. 北京:中国电力出版社,2004:4-25.

丁明(1956—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统规划及可靠性、新能源及其利用、柔性输电系统的仿真与控制。E-mail:mingding56@126.com

杨向真(1982—),女,通信作者,博士研究生,主要研究方向:分布式发电技术。E-mail:greenleaf_yxz@hotmail.com

苏建徽(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:光伏发电技术、分布式发电技术。E-mail:su_chen@126.com

Control Strategies of Inverters Based on Virtual Synchronous Generator in a Microgrid

DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui

(Research Center for Photovoltaic System Engineering Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A new inverter based on the electromechanical transient model of synchronous generator (which is referred to as virtual synchronous generator) is presented. A power controller and a voltage-frequency controller are designed to make the inverter with double function of controlling power and modulating frequency and voltage. Furthermore, when microgrid is faulty, uninterruptable electrical power can still be supplied to important loads of the microgrid. A pre-grid unit designed enables safe connection of the inverter and a microgrid. When the microgrid connecting with the main grid, frequency is decided by the main grid, so power control strategy is employed in each virtual synchronous generator to control its dispatchable output power. When the microgrid is islanding, voltage reference should be provided by one inverter using voltage-frequency controller. In addition, it is convenient to be modularized and standardized because virtual synchronous generator with the same capacity can be replaced freely in the microgrid. This scheme will increase the flexibility of microgrid and enhance the reliability of system control strategy, which has been verified by the MATLAB/Simulink.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50777015, 50837001) and the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2007AA05Z240).

Key words: microgrid; virtual synchronous generator; frequency and voltage regulation; power control; pre-grid unit

附录 A VSG 频率有差调节器分析

以单台 PQ 控制的 VSG 带载为例，由频率有差调节器得：

$$P_m^* = P_{ref}^* + K_p (f_{ref}^* - f)$$

一般 K_p 取值较大，以保证频率偏差在允许范围内，此时，虚拟同步发电机算法中的转子运动方程可近似为：

$$P_m - P_e - D\Delta\omega = J \frac{d\Delta\omega}{dt}$$

式中： $P_m = P_m^*$ ； $\omega = 2\pi f$ 。

联立上述 2 个式子并进行拉氏变换后得：

$$P_{ref}^* - P_e = (K_p + 2\pi D)\Delta f + 2\pi J s \Delta f$$

式中： $\Delta f = f - f_{ref}^*$ 。

因此，比例系数 K_p 实质上增大了系统的等效阻尼系数，缩短了暂态时间，有利于抑制系统频率的振荡。

附录 B VSG 端电压与无功电流特性分析

由 PQ 控制器中电压有差调节器可得 $\Delta I_f^* = K_{up} \Delta U$ ，即端电压与励磁电流呈线性关系。若取定子电枢电阻远小于同步电抗，且忽略滤波器中的阻性成分，则虚拟同步发电机可等效为图 B1 所示的内电动势为 \dot{E}_{0i} ($i=a,b,c$) 和等效电抗为 X_i 的电压源，由相量图可得下式：

$$E_{0i} \cos \delta = U_i + I_Q x_i$$

式中： δ 为感应电动势和端电压之间的相角，即功率角， φ 是功率因数角， I_Q 为 VSG 的无功电流。

一般 δ 值很小，可认为 $\cos \delta \approx 1$ ，可得简化后的运算式为：

$$E_0 \approx U_G + I_Q x_i$$

可见，当端电压一定时，无功电流与感应电动势近似成线性关系，另外，正常运行时，频率在基频附近变化，感应电动势与励磁电流近似成线性关系，因此，与同步发电机类似，虚拟同步发电机的端电压与无功电流近似成线性关系，且端电压随无功负荷的增大而减小。

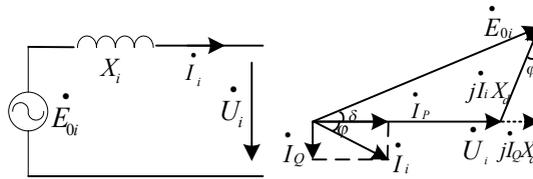


图 B1 VSG 的电路示意图和相量图

Fig.B1 Equivalent circuit diagram and phase diagram of virtual synchronous generator

附录 C

图 C1 中,inv1 的额定容量为 10 kVA,额定频率为 50Hz,额定输出线电压为 380V;变压器为 Y,d11 型,线电压比为 420V : 120V;电枢电阻 $r_a=0.02 \Omega$,同步电抗 $z_i=0.5mH$,转动惯量 $J=0.22kg \cdot m^2$,阻尼系数 $D=0$;滤波电感 $L_{fi}=0.2mH$,滤波电容 $C_{fi}=100 \mu F$;电感 $L_i=0.5mH$ 。inv2 除电枢电阻 $r_a=0.01 \Omega$ 、同步电抗 $L_i=0.2mH$ 外,其他参数与 inv1 相同。负荷 3 为 10 kW 的可中断负荷。

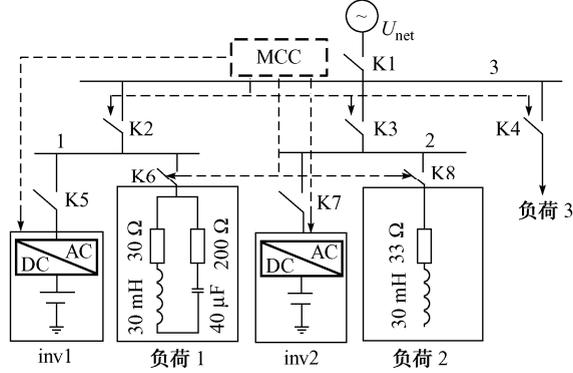


图 C1 仿真模型
Fig.C1 Simulation model