

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.02.012

基于虚拟同步机技术的电力电子变压器控制策略*

倪晨鸿, 宋春伟

(中国计量大学 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对电力电子变压器(power electronic transformer, PET)的并网控制策略进行研究,提出基于虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)的PET并网控制策略,分析在传统PET拓扑结构的VSG控制策略和小信号模型,提出传统PET拓扑的VSG模型具有高阶多目标的问题。为了简化VSG控制模型,提出一种简化VSG的PET控制方案,分析了其双闭环结构的小信号模型及其与传统PET的VSG模型相比较后的优势。通过PSCAD/EMTDC仿真试验验证了基于简化VSG的VSG并网控制的有效性。研究结果表明,应用VSG控制模型能够简化PET的并网控制策略,使PET系统更加适合电网调度。

关键词:虚拟同步发电机;电力电子变压器;并网逆变器

中图分类号:TM41;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)02-0161-06

Virtual synchronous generator based control scheme of power electronic transformer

NI Chen-hong, SONG Chun-wei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at grid-tied control scheme and topology of power electronic transformer (PET), virtual synchronous generator (VSG) based control scheme of PET was proposed in this paper. Firstly, VSG based control scheme and its small signal model of traditional PET topology were analyzed, and high-order and multi-objective characteristics of the proposed VSG control model were investigated. Aiming to simplify VSG model of PET, a novel PET control method based on a single VSG model was researched. The novel small signal model with a double closed-loop structure was analysed and its advantages were given compared with the VSG model of the traditional PET. The validations of the VSG based grid-tied control scheme was verified by simulation results on a PSCAD/EMTDC model of the novel PET. The results indicate that the VSG based control method simplifies grid-tied control scheme of PET, which makes PET more suitable for power grid dispatching.

Key words: virtual synchronous generator; power electronic transformer; grid-tied inverter

0 引言

虚拟同步机(VGS)是将电力电子变流器模拟为旋转同步电机而进行控制的技术,它能够将被控对象模拟同步电机,实现与电网的同步运行。分布式电源、电动汽车充电站和储能系统的电网接入部分都是以电力

电子变流器为核心设备^[1-2],因此,VSG技术为解决这些系统的并网问题提供了有效方案。VSG技术能够为包含分布式电源的电网提供有效的电压和频率支撑,能够为薄弱的微网系统提供必要的阻尼作用^[3],将不同电源系统中的并网逆变器改造为具有转动惯量和正阻尼系数的虚拟同步机,使它们更好适应电

收稿日期:2016-10-11

基金项目:浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ16E070001);浙江省重中之重学科开放基金项目(JL150512)

作者简介:倪晨鸿(1982-),女,江苏启东人,硕士,主要从事电子检测技术方面的研究. E-mail: nichenhong23@163.com

通信联系人:宋春伟,男,博士,讲师,硕士生导师. E-mail: Scw0220@yahoo.com.cn

网的调度运行。虚拟同步机技术的应用和推广不仅有利于微电网的稳定运行,而且有利于分布式电源和储能系统等技术的发展。电力电子变压器作为一种具有高低压电能转换功能的电力电子设备,能够实现灵活的电流和电压控制,有效改善电能质量和控制潮流^[4]。PET 技术被广泛认为在未来电网中有着良好应用前景,在“未来再生电能传输和管理网络”中能够发挥核心的作用^[5-6],对主动型配网的建设也有着促进作用^[7]。

针对 PET 控制方面已有文献发表:文献[8]是针对 PET 内部一次侧多个直流母线的均压控制策略,文献[9]是采用一种无电流传感器方式实现均压控制的方法,文献[10]是采用非线性控制方法改善 PET 的动态过程特性,文献[11]是采用下垂控制和虚拟阻抗控制抑制微网中多个电力电子变压器之间的环流。上述文献都是针对 PET 电路功能实现方面控制问题的研究,而对于 PET 并网控制策略进行研究的文献相对较少。这一方面是因为缺乏 PET 实际电网运行的经验,另一方面是因为 PET 控制的灵活度高,难以参与电网调节。

针对 PET 的并网控制策略问题,本研究提出将虚拟同步机技术应用于 PET 的控制系统,使 PET 系统中与电网连接的逆变电路具有与同步发电机相似的外特性。首先分析基于传统 PET 拓扑的虚拟同步机模型,提出基于 VSG 的 PET 控制器存在阶数高、结构复杂和耦合度高的问题。然后针对这个问题,本研究提出一种简化 VSG 模型的 PET 控制算法,并通过仿真结果验证简化 VSG 控制方法的有效性。

1 PET 的 VSG 控制

1.1 VSG 模型

根据文献[12]的论述,包含高低压两组直流母线的“双交直交结构”PET 拓扑是功能最全面同时也是被研究最多的拓扑种类,PET 拓扑可以分为 3 个部分:输入级变流器 UC1,输出级变流器 UC2 和高频 DCDC 变流器 UC3。其中,UC1 和 UC2 都是标准三相全桥逆变电路,它们的作用都是完成工频交流电到直流电的转换;UC3 首先将直流电转换为高频率方波交流电,再经过高频变压器降低电压,最后将低压的高频方波转换为直流电输出到 UC2。UC3 中包含的高频变压器环节也是 PET 最基本的电路特征。

PET 结构框图如图 1 所示。

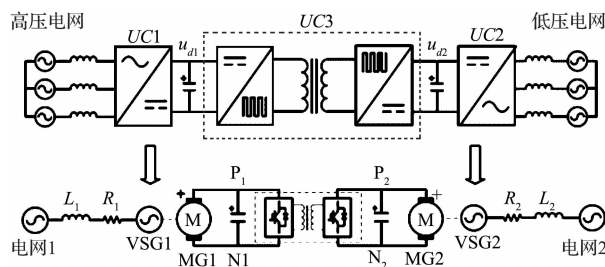


图 1 传统 PET 的 VSG 控制模型

PET 拓扑中还包含高低压直流母线 P_1N_1 和 P_2N_2 ,这两组直流母线对 PET 一次侧和二次侧有电气解耦的作用,可以使得变流器 UC1 和 UC2 独立运行。如图 1 所示,UC1 和 UC2 分别被等效为虚拟同步机 VSG1 和 VSG2, L_1 是综合了一次侧滤波电感和网侧线路电感的同步电感,而滤波器电阻 R_1 等效为 VSG1 的等效电枢电阻。参数 L_2 和 R_2 同理等效为 VSG2 的对应参数。VSG1 输出的机械功率通过联轴器无损的传输给“虚拟直流发电机”MG1,驱动 MG1 对直流母线 P_1N_1 进行充电。高压母线 P_1N_1 经过高频 DCDC 电路转换为低压直流母线 P_2N_2 。虚拟直流电动机 MG2 将来自母线 P_2N_2 的功率无损的输出到 VSG2 中。VSG2 将这部分机械功率转化为电能传输到二次侧低压电网。模型中的 MG1 和 MG2 是理想的电机,没有损耗和转动惯量,只起到无损传输功率的作用。

1.2 控制策略

UC1 和 UC2 的控制策略可以参考 VSG 控制方法。UC3 采用文献[13]所述的“单边移相 PWM”的控制方法。UC3 的传输功率 P_T 都和变压器两边电路的 PWM 信号相位差 D_R 存在如式(1)所示的数学关系。

$$P_T = \frac{nu_{d1}u_{d2}D_R(1 - D_R)}{2f_sL_T} \quad (1)$$

式中: n —高频变压器匝比, f_s —UC3 中功率器件的开关频率, L_T —变压器一次侧和二次侧的综合漏感参数。在其他参数不变的条件下,根据给定值 P_T 可以解出 D_R 的数值。

图 2 中,UC1、UC2 和 UC3 的控制器都是围绕输入的功率指令信号设计的。UC1 和 UC2 的无功功率控制是相互独立的。如果 u_{d1} 和 u_{d2} 处于正常范围内,那么 UC1 和 UC2 有功功率控制也是可以独立的。然而实际 PET 的母线电容的容值是有限的,尤其是高压侧的直流电容,因此 PET 的控制器设计需要把稳定高低压直流母线电压作为其重要控制目标。实际 PET 一次侧直

流母线是多母线串联组成,其控制器设计还需要考虑多母线均压问题,因此这类 PET 的设计是一个多目标控制问题。UC1 的 VSG 控制需要输入有功指令 $P_{1\text{ref}}$ 和无功指令 $Q_{1\text{ref}}$, UC2 的 VSG 控制需要输入指令信号 $P_{2\text{ref}}$ 和 $Q_{2\text{ref}}$, 而 UC3 的控制需要有功指令信号 $P_{T\text{ref}}$ 。图 2 给出了一种 PET 功率信号生成方案:二次侧母线充电(放电)功率指令 $P_{2\text{Cref}}$ 是由二次侧母线电压 $U_{\text{dc}2}$ 与其指令值 $U_{\text{dc}2\text{ref}}$ 之差经过 PI 调节器获得的; $P_{2\text{ref}}$ 与 $P_{2\text{Cref}}$ 之和作为 UC3 传输功率指令 $P_{T\text{ref}}$;而一次侧 $P_{1\text{ref}}$ 和 $P_{1\text{Cref}}$ 的生成过程也是类似的方法。图 2 中控制系统是通过各个功率环调节作用完成了对两组直流母线的稳压控制,控制信号框图如图 2 所示。

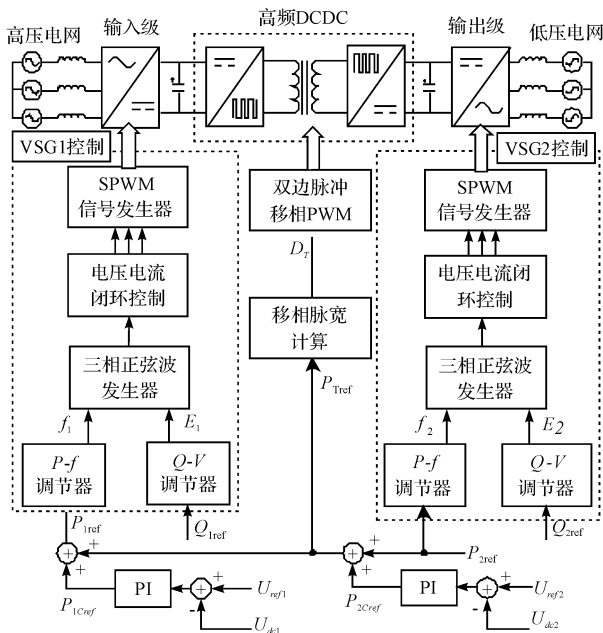


图 2 传统 PET 的 VSG 控制信号框图

1.3 小信号模型

参考同步发电机的两阶模型,单台 VSG 等效转子运动方程如式(2)所示。为便于分析,电机的极对数假设等于 1,同时假设电气角速度 ω 与机械角速度 ω_m 相等。

$$\begin{cases} \delta = \omega \\ J\dot{\omega} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: δ —同步发电机的功角, J —转动惯量, ω_0 —电网同步角速度, T_m 、 T_e —机械转矩和电磁转矩, D —与阻尼转矩对应的阻尼系数。

本研究为了简化参数 J 和 D 的整定过程,定义惯性时间常数 H 以表征了 VSG 在额定转矩下从静止启动到额定转速所需的时间,其表达式如式(3)所示:

$$H = \frac{J\omega_0^2}{S_n} \quad (3)$$

式中: S_n —系统的额定容量。

将式(3)关系式代入式(2)中转矩方程,将其改写成如式(4)所示的功率方程形式:

$$H\dot{\omega} = P_{\text{ref}}^* - P_e^* - D\omega \quad (4)$$

式(5)是两组直流母线充电功率与母线电压的数学关系:

$$\begin{cases} \dot{u}_{d1} = \frac{(P_1 - P_T)}{u_{d1}} \\ \dot{u}_{d2} = \frac{(P_T - P_2)}{u_{d2}} \end{cases} \quad (5)$$

参照 VSG 的小信号模型设计方法,同时依据式(4~5),可以得到图 3 所示的基于 VSG 控制 PET 的小信号模型。

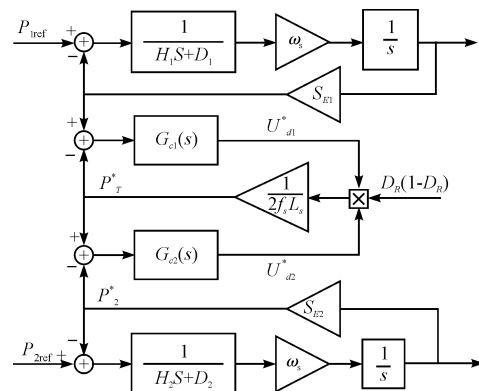


图 3 传统 PET 的 VSG 小信号模型

S_E —同步功率的标幺值,在功率指令值确定的条件下它是一个常数

PET 的 VSG 控制不仅需要整定两套 VSG 的参数,而且需要考虑两组直流母线电压的控制问题。因此,整个 PET 的 VSG 控制系统是一个高阶多目标控制的问题,参数整定和控制器设计的难度都比较高。

2 简化 VSG 控制

针对 PET 的 VSG 控制模型中高阶多目标的问题,笔者提出一种基于简化单边 VSG 模型的 PET 控制算法。简化控制模型中的二次侧逆变部分还是一样等效为一个 VSG 进行控制。二次侧 VSG 控制器是由有功调节、无功调节和电磁方程等部分组成,一次侧输入级控制不再像 1.1 节所述的那样采用 VSG 的控制方法,而是依靠一次侧直流母线的解耦作用,实现独立的 PWM 整流控制。采用电压和功率双闭环的形式,电压环目的是为了稳定一次侧直流母线电压,而功率环的指令信号来自于后端电路的功率信号。因为本节阐述 PET 控制方法只对二次侧变流器采用 VSG 技术进行控制,笔者将其称为简化 VSG 控制算法。

中间高频隔离部分的控制主要是通过调节占空比 D_R 使得输入功率 P_1 跟随其指令值 P_{1ref} 。一次侧功率环采用 PID 调节器, 功率环输出结果叠加上直流电压指令信号 U_{2ref} 查表后的结果即为占空比 D_R 。这部分移相 PWM 控制的基本原理已在 1.2 节中阐述。一次侧直流

母线电压 u_{dc1} 的控制是由输入级三相变流器控制; 而二次侧直流母线电压 u_{dc2} 的控制是由中间级高频 DCDC 电路和输出级逆变器共同完成, 这两部电路的控制系统是由功率信号进行统一。中央控制器信号框图如图 4 所示。

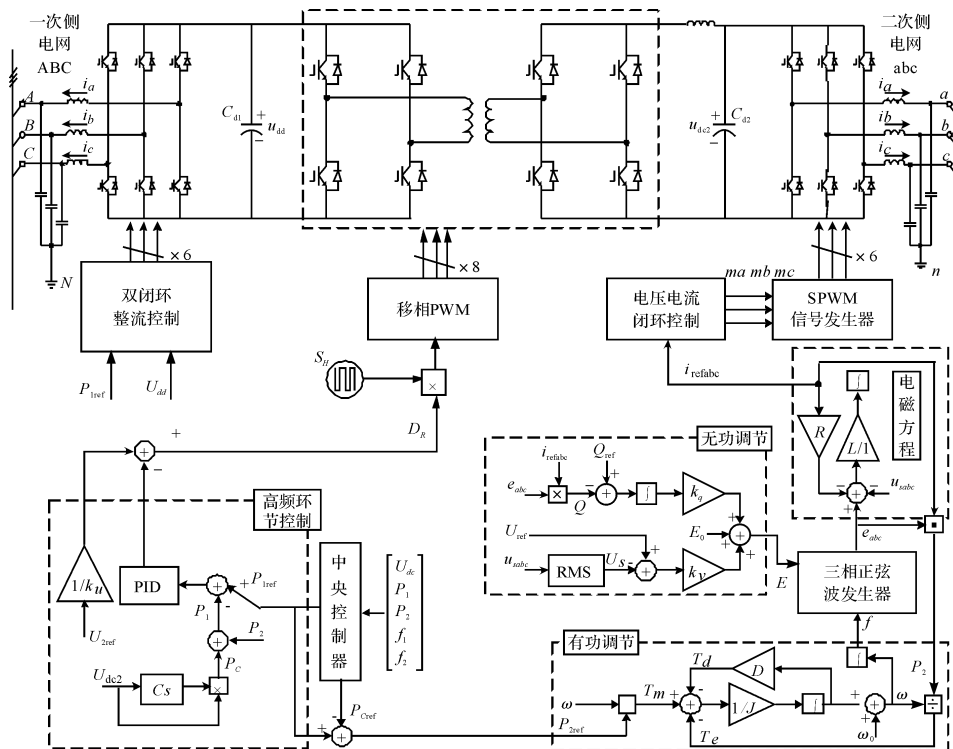


图4 中央控制器信号框图

PET 对两侧电网无功的调节可以是相互独立的, 本研究不做探讨; 而有功功率的调节也是需要考虑直流母线电压波动的问题。在忽略电路损耗的条件下, 输入功率 P_1 等于二次侧母线充电功率 P_C 和输出功率 P_2 之和。

如果两侧电网频率调节要求不同, 那么依靠母线电容的储能效应也是能够支撑输入输出功率 P_1 和 P_2 之间的差值。但是如果母线电压 u_{dc2} 超出正常范围, 那么就需要调节 P_1 和 P_2 来实现对母线电容的充电或者放电, 使得电压 u_{dc2} 回到正常的范围内。因此, 中央控制器在计算输入功率指令 P_{1ref} 和母线充电功率指令 P_{Cref} 时, 不仅需要以一次侧和二次侧电网的频率 f_1 与 f_2 调节为控制目标, 而且还需要考虑母线电压 u_{dc2} 的稳定。

图4中中央控制器的一种设计方案如图5所示。

图5提出图4中的中央控制器的一种设计方案: 中央控制器采用两个数据选择器 MUX 1 和 MUX 2 分别对功率指令信号 P_{1ref} 和 P_{Cref} 的取值进行选择, 选择源的信号来自于 u_{dc2} 与其基准值的差值 ΔU_{dc} 。如果 ΔU_{dc}

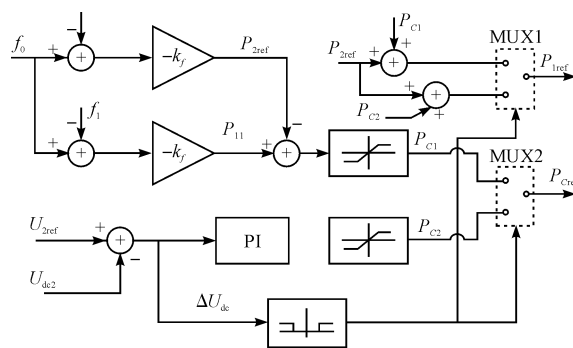


图5 中央控制器信号框图

在正常范围内, 那么可以根据两侧频率偏差分别计算一次侧和二次侧的有功功率指令, 根据两者差值限幅后的结果 P_{C1} 作为充电功率指令, 再由 P_{C1} 对 P_{1ref} 进行修正; 如果 ΔU_{dc} 超出正常范围, 那么选择关闭一次侧的频率调节, 将直流电压调节环的输出 P_{C2} 作为 P_{Cref} 的取值。

按照图4中所示的控制框图, 简化模型的小信号稳定分析模型如图6所示, 该模型是针对功率信号的闭环控制系统。

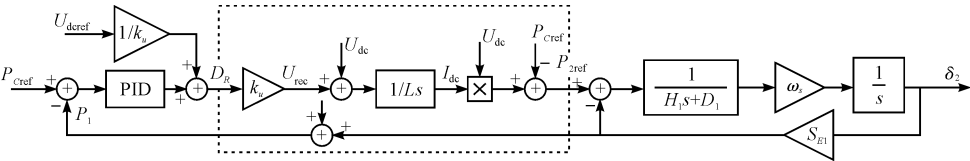


图 6 简化 VSG 控制小信号模型

因为二次侧逆变电路的控制完全按照 VSG 原理进行设计,这部分电路和 1.3 节的内容一样等效于 VSG 二阶系统。中间隔离级的数学模型可以被等效为图中虚线框的部分。这部分电路在小信号模型条件下, U_{dc} 、 P_{cref} 和 P_c 等变量都是常数,模型可以等效于一阶系统。因此,整个简化控制系统开环传递函数是一个三阶系统,采用普通的 PID 调节器就能够校正系统的特性。另一方面,图 6 中控制系统内环是标准 VSG 小信号模型,参考“最优二阶系统”的原理,可以整定其惯性参数和阻尼参数,使得内环系统具有快速响应和较小超调的特点;完成了内环参数整定后,可以根据整个系统的三阶开环传递函数的幅频 - 相频特性曲线或者根轨迹进行 PID 参数的整定。

相比 1.3 节的传统 PET 的 VSG 小信号模型,新型 PET 的 VSG 控制模型的阶数低,其小信号模型可以简化为一个针对功率信号双闭环控制系统,参数整定可以按照内环和外环两部分进行,实现了简化控制算法的设计目标。

3 仿真试验

为了验证应用 VSG 控制方法的新型 PET 的工作

原理,采用 PSCAD/EMTDC 搭建基于 VSG 控制的 PET 仿真模型,其参数如表 1 所示。

表 1 PET 的 VSG 仿真试验参数

参数	取值 / 单位	参数	取值 / 单位
U_{s1}	6 kV	L_{2s}	1 mH
U_{s2}	380 V	J	0.01 kg · m ²
S_n	100 kVA	D	5
L_1	2 mH	R_1	0.2 Ω
L_2	1 mH	R_2	0.2 Ω
C_2	30 μF	k_f	0.03
C_{d1}	1 μF	k_q	0.01
C_{d2}	10 000 μF	k_v	0.02

L_2 、 C_2 —二次侧逆变器的滤波电感值和电容值; L_{2s} —二次侧网侧电感值; L_1 —一次侧综合电感参数; R_1 、 R_2 —一次侧和二次侧电网的等效电阻参数;其他参数参照第 1 和第 2 节的定义

此外,为了满足高频变压器设计要求,一次侧 IGBT 的开关频率选择为 20 kHz;二次侧的开关频率选择为 10 kHz。仿真功率波形如图 7 所示。

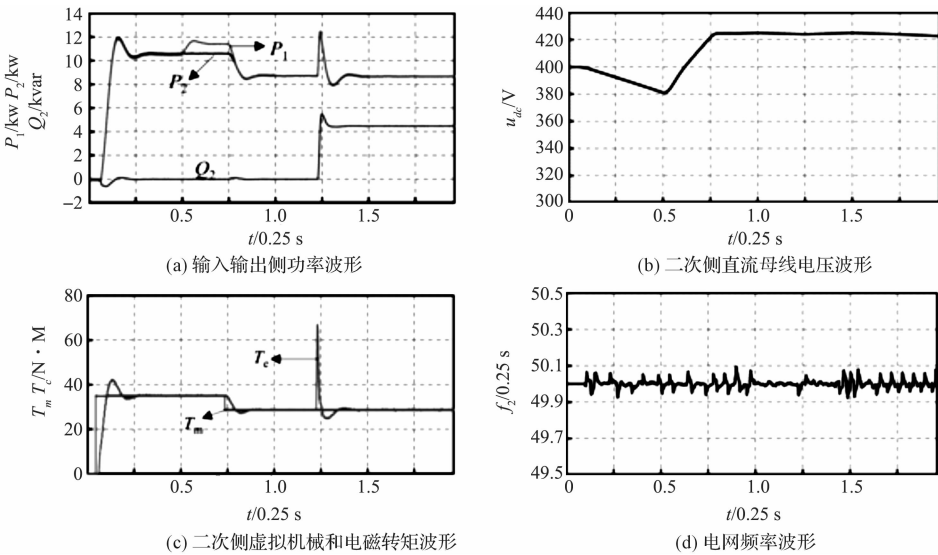


图 7 仿真试验波形

在 0.05 s 的时刻,功率指令发生阶跃,二次侧有功无功功率指令分别为 10.5 kW 和 0 kvar,一次侧有

功率指令为 10.2 kW。在 0.05 s 到 0.5 s 的时间段内,依靠直流母线释放的电能对两侧电网分别提供不

同有功功率以调节两侧电网频率,此阶段内直流母线处于放电的状态。在 0.5 s 时直流母线电压 u_{dc} 下降到 380 V,超出了正常工作的范围。在 0.5 s 到 0.7 s 的时间段内,调节两侧电网功率 P_1 和 P_2 的指令值分别为 11.5 kW 和 10.5 kW,对母线充电使得 u_{dc} 在 0.6 s 时刻左右回升到 400 V,继续充电使得 u_{dc} 在 0.75 s 上升到 420 V,结束充电状态;在 0.75 s 时, P_1 和 P_2 的指令值分别调整为 8.5 kW 和 8.4 kW;在 1.25 s 时, Q_2 的指令值调整为 4.5 kvar,输入输出功率经过短时间的振荡最后趋于稳定。图 7(c) 所示的虚拟电磁转矩和机械转矩的变化趋势和功率信号波形基本一致,图 7(d) 所示的电网频率是在电网允许的范围内波动。图 7 的仿真结果显示 PET 按照虚拟同步机的原理对电网频率起到了调节作用,同时它也能通过对输入输出功率的控制来稳定内部直流母线电压。

4 结束语

本研究基于虚拟同步发电机(VSG)技术,研究了电力电子变压器(PET)的并网控制策略。通过研究最典型的双交直交结构 PET 的拓扑,提出了基于 VSG 的 PET 控制方法。该方法将一次侧和二次侧的并网电路部分分别等效为一个 VSG 进行控制。其小信号模型分析说明了该控制方法的模型是具有高阶多目标的问题。为了实现 VSG 技术对 PET 电路的可靠和简化控制的目的,提出了一种简化的单边 VSG 模型的 PET 控制方法。PET 结合 VSG 并网控制技术能够将控制模型简化为只针对功率信号为控制目标双闭环结构的系统,小信号模型的开环传递函数阶数为三阶,实现了简化控制算法的目的。本研究通过仿真和样机试验分别验证所提 VSG 控制策略的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 曾正,邵伟华,冉立,等.虚拟同步发电机的模型及储

能单元优化配置[J].电力系统自动化,2015,39(13):22-31.

- [3] 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.
- [4] 毛承雄.电子电力变压器[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [5] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet[J]. **Proceedings of the IEEE**, 2011, 99(1): 133-148.
- [6] XU S, BURGOS R, GANGYAO W, et al. Review of solid state transformer in the distribution system: From components to field application[J]. **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, 2012, 11(4): 4077-4084.
- [7] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等.微电网技术在主动配电网中的应用[J].电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
- [8] XU S, HUANG A Q, GANGYAO W. 3-D Space Modulation With Voltage Balancing Capability for a Cascaded Seven-Level Converter in a Solid-State Transformer[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2011, 26(12): 3778-3789.
- [9] XU S, HUANG A Q, XIJUN N. Current Sensorless Power Balance Strategy for DC/DC Converters in a Cascaded Multi-level Converter Based Solid State Transformer[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2014, 29(1): 17-22.
- [10] 刘海波,毛承雄,陆继明,等.配电系统电子电力变压器非线性控制[J].中国电机工程学报.2009,29(27):1-8.
- [11] 张明锐,林显琦,孙华.孤岛微网中固态变压器间环流抑制研究[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5563-5570.
- [12] 安婷.配网智能设备中电力电子智能变压器的研究[J].智能电网,2013,1(2):7-10.
- [13] HUA B, MI C. Eliminate Reactive Power and Increase System Efficiency of Isolated Bidirectional Dual-Active-Bridge DC-DC Converters Using Novel Dual-Phase-Shift Control[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2008, 23(6): 2905-2914.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

倪晨鸿,宋春伟.基于虚拟同步机技术的电力电子变压器控制策略[J].机电工程,2017,34(2):161-166.

NI Chen-hong, SONG Chun-wei. Virtual synchronous generator based control scheme of power electronic transformer[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(2): 161-166.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn