

基于虚拟同步发电机的储能型光伏逆变技术

采用虚拟同步发电机控制策略,并配置储能装置,使光伏发电系统对外体现同步发电机的优良特性,具有调压调频的功能,有利于系统孤岛和并网运行。首先阐述了光伏电池的发电特性;然后建立了系统结构和虚拟同步发电机的数学模型,并设计了电路的控制模块;最后在Matlab/Simulink环境中搭建了系统模型,仿真结果验证了所用策略的正确性和优越性。

陈毛欣 李 岚/太原理工大学电气与动力工程学院

随着煤炭、石油等化石燃料的日益枯竭,太阳能以其资源丰富、分布广泛和可持续性好等优点成为世界各国争相利用的新能源之一^[1]。目前为止,各国已有多座大型光伏电站投入应用,光伏发电产业前景广阔。

在大规模光伏发电中,环境(光照和温度)的剧变会使光伏发出波动很大的功率,造成输出电压和系统频率不稳,从而给负荷的运行带来危害。如果在系统中配置储能装置,可以对光伏发电进行功率补偿,平抑光伏发电的不足,维持输出功率平衡。然而要达到功率调度和调压调频的双重效果,需要引入合适的控制技术。本文在结合光伏发电特点的基础上,提出了一种基于虚拟同步发电机的储能型逆变策略。该控制策略通过模拟同步发电机的运行状态,使整个系统对外表现出同步发电机的优良特性,根据负荷变化调节自身输出功率,维持频率和电压的稳定,这将会大幅度提升光伏发电的性能。

光伏发电特性

光伏电池是光伏发电系统的核心单

元,其工作原理是以P-N结上光生伏特效应为基础。光伏发电功率大小与环境温度、光照强度以及自身容量有关,当这些因素发生变化时,其端电压会随之改变,同时输出功率也发生变化。一定条件下光伏电池功率-电压输出特性曲线如图1所示。

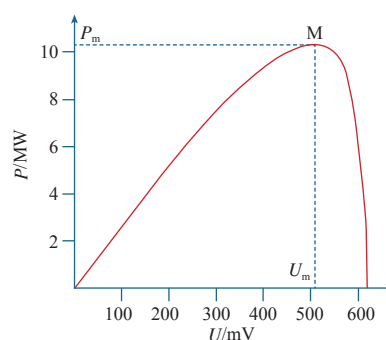


图1 光伏电池的功率-电压输出特性

由图1可知,在一定的光照强度和环境温度下,光伏电池的工作电压和发出功率一直在变化。应用储能装置可以及时补偿这种变化,降低环境因素的影响,提高光伏发电的稳定性。

系统结构与虚拟同步发电机建模

本文所设计的系统结构如图2所示。主电路为两级式变换电路:前级的Boost电路用于实现最大功率跟踪;后级的逆变器采用电网电压定向矢量控制^[3],保证光伏发电功率的传输。在并联支路中配置储能电池,并采用虚拟同步发电机控制策略,可以对光伏发电输出进行互补,使整个系统对外保持平衡,维持输出电压和系统频率的稳定。其控制流程为:首先采样输出端电压 U^* 和系统频率 f ,经控制模块控制和计算可得到虚拟同



陈毛欣/硕士研究生

关键词/Keywords

光伏发电·
储能装置·
虚拟同步发电机·
功频调节·

步发电机模型所需的 P_1 和 E_0 ；然后采样并联支路电流 i 并计算储能电池发出的有功功率 P_e ，将这些参数代入虚拟同步发电机模型，运算后可得到控制所需的指令电压 U_{ref} ；最后将其送入SVPWM控制算法中调制产生脉冲信号，从而控制IGBT开断，实现闭环控制。通过将这些变量进行闭环控制，使控制更加准确，模拟特性更加真实。

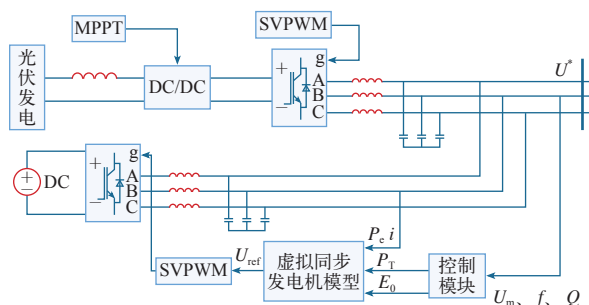


图2 系统结构框图

对于不同的需求和应用场合，同步发电机模型有不同的简化结构。对于虚拟同步发电机本体建模，本文期望实现同步发电机的基本响应特性，采用最为简化的二阶模型，其方程组为

$$\begin{cases} U = E - (r_a + jX_d)I \\ J \frac{d\Delta\omega_m}{dt} = T_m - T_e = \frac{P_m}{\omega_m} - \frac{P_e}{\omega_m} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\omega t + \delta)}{dt} \\ \omega = \omega_m p \end{cases} \quad (1)$$

式中， E 为励磁电动势； r_a 为定子电枢电阻； U 为定子端电压； X_d 为同步电抗； I 为电枢电流； J 为转动惯量； ω_m 为机械角速度； T_m 为机械转矩； T_e 为电磁转矩； P_m 为机械功率； P_e 为电磁功率； ω 为电角速度； θ 为励磁电动势相角； p 为极对数； δ 为励磁电动势和定子端电压之间的夹角。

式(1)中各变量均采用有名值，单位为国际标准单位。其中，电压方程表示同步发电机定子的电气特性；转矩方程表示转子的机械特性。基于以上方程及简化计算，可设计出虚拟同步发电机控制算法框图，如图3所示。在系统中引入虚拟同步发电机控制算法，并设计相应的控制器，就可使系统对外体现出同步发电机的特性，较好地

满足微电网运行要求。

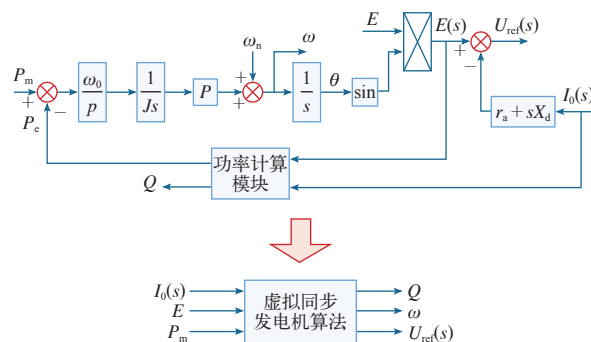


图3 控制算法结构框图

虚拟同步发电机控制器设计

针对虚拟同步发电机的模型结构，结合同步发电机的调节原理，设计了系统的控制模块。其中控制模块又包括功频控制和励磁控制，通过分别对有功功率和无功功率的快速调节，维持频率和电压的稳定^[4]。

1. 功频控制器

电力系统频率是由有功功率的平衡关系来维持的。当这种平衡关系遭到破坏时，系统的频率会发生偏离。在实际运行中，当频率偏移时，调速器工作通过改变原动机出力以满足负荷变化的需求，使系统建立新的平衡，但转速和频率不同于初始额定值，即负荷增加时，频率变小；负荷减少时，频率变大。这种有差调节即为电力系统中的频率一次调整，其功频静特性曲线如图4所示。

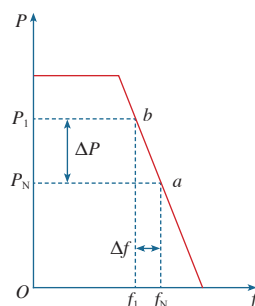


图4 发电机组功频静特性

图4中，设 a 点处于发电机额定工作状态，此时频率为 f_N ，输出功率为 P_N ；当有功负荷增加时，发电机转速降低，频率变为 f_1 ，同时调速器作用，增大发电机发出功率，维持功率平衡进而稳定工

作在b点。在调节过程中,有功负荷增加 ΔP ,频率相对应地将下降 Δf ,表现为一种反向调节特性。因此根据这种调节原理设计了虚拟同步发电机功频控制结构框图,如图5所示。

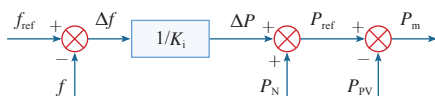


图5 功频控制器原理框图

图中, K_i 为调差系数; P_N 为负荷预测的额定有功功率; P_{PV} 为光伏阵列发出的有功功率。通过功频控制器控制, 频率的变化会使有功功率随之变化, 进而改变虚拟同步发电机机械功率 P_m , 使其与电磁功率 P_e 保持平衡, 维持频率稳定。

2. 励磁控制器

电力系统中电压的稳定,是靠系统在任意时刻电源发出的无功功率等于负荷所消耗的无功功率来维持的。其无功-电压静态特性曲线如图6所示。

图6中, 设额定状态下系统所消耗的无功功率为 Q_N , 输出电压为 U_N ; 当无功负荷减少为 Q_A 时, 受无功功率平衡关系的制约, 电网电压会降低至 U_A , 即工作于A点。由此, 对应于负荷无功功率的增加或减少, 系统的工作电压将会升高或降低。

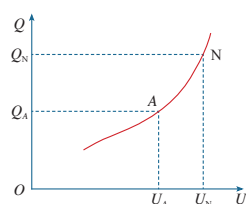


图6 无功—电压静态特性

根据这一原理，设计了无功励磁器调节框图，如图7所示。

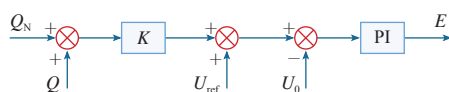


图7 励磁调节器原理框图

图7中, K 为电压调差系数, 其大小反应系统调节电压的能力; 通常设定 $Q_N=0$, 系统工作在单位因数状态; U_{ref} 为给定的额定电压幅值; U_0 为系统实际输出的电压幅值, 其运算差值经PI控制可得到虚拟同步发电机算法中励磁电动势幅值。

系统仿真与分析

本文在分析虚拟同步发电机本体模型和控制
器原理的基础上,在Matlab/simulink环境下搭建
了系统的仿真模型,如图8所示。为了更明显地观

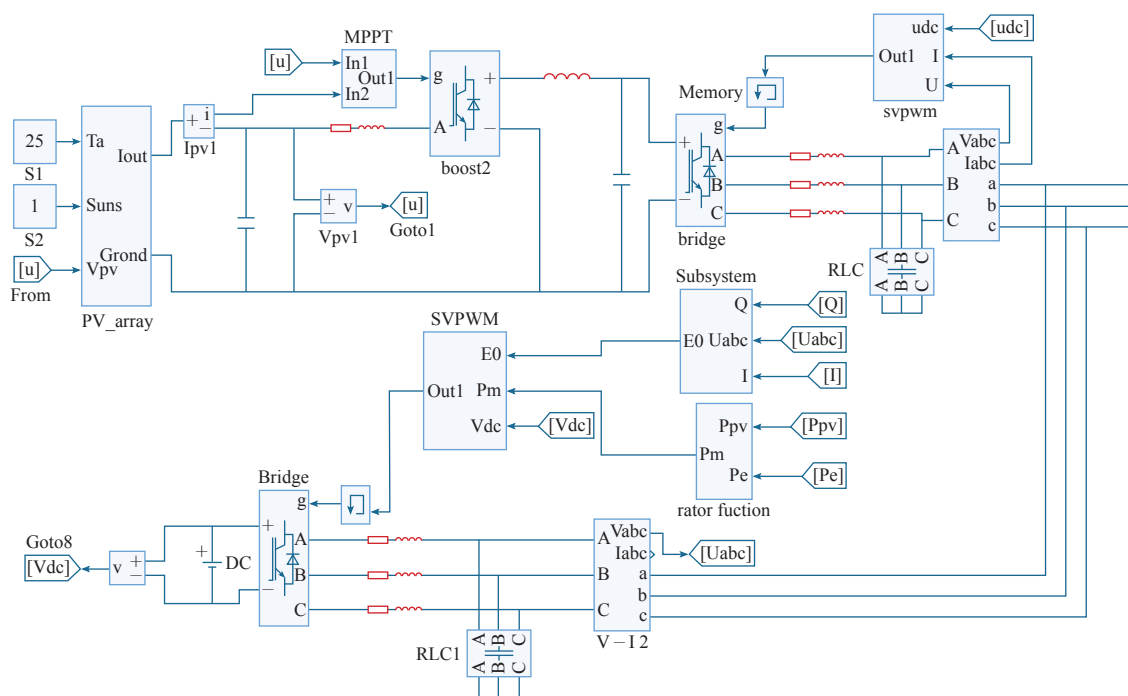
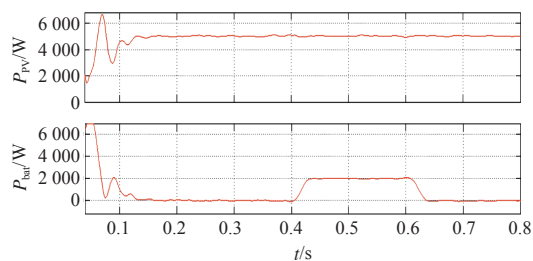


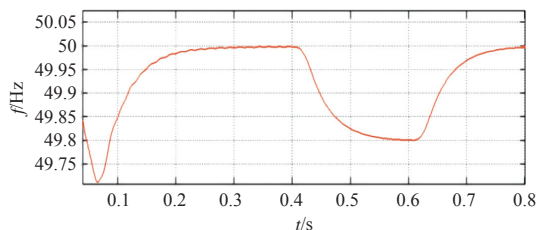
图8 光伏发电系统仿真图

察功率调节和调频调压的效果,仿真中系统始终处于孤岛运行模式。设定外界环境温度为 25°C ,光照强度为 $1\text{ kW}/\text{m}^2$,此时光伏电池发出额定功率为 5 kW 。为满足实际需要和并网要求,系统额定频率为 50 Hz ,额定线电压为 380 V ,设定 K_i 值为 $0.000\ 01$, K 取值为 0.003 。通过模拟外界环境变化和负荷波动,验证系统对外能够体现的同步发电机特性。

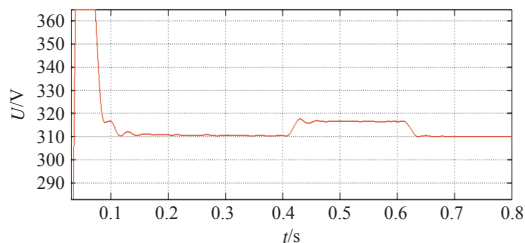
仿真中,系统带额定有功负荷 5 kW ,为了使仿真效果更明显, 0.4 s 时增加有功负荷 2 kW ,无功负荷 2 kvar , 0.6 s 时恢复额定负荷运行。仿真结果如图9所示。



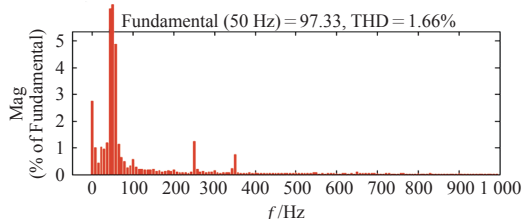
(a) 光伏和储能输出有功功率



(b) 系统频率变化



(c) 输出电压变化



(d) 并网电流总畸变率

图9 仿真结果

图9a中, P_{PV} 为光伏电池按MPPT输出的功率; P_{bat} 为储能装置补偿输出的功率。 0.4 s 以前, P_{bat} 为 0 ,频率为 50 Hz ,相电压幅值为 311 V ; $0.4\sim 0.6\text{ s}$ 时,有功、无功负荷各增加 2 kW ,光伏阵列输出功率基本不变, P_{bat} 增加 2 kW ,频率下降 0.2 Hz ,电压将增加 6 V ; 0.6 s 后,恢复额定负荷, P_{bat} 为 0 ,频率变为 50 Hz ,相电压幅值变为 311 V 。仿真过程中,当负荷增加时,光伏阵列由于环境的限定发出的功率保持不变,对储能装置进行及时补偿,并使系统表现出有功增加、频率下降以及无功增加、电压升高的特性,与传统的同步发电机特性相同。图9d反映了当系统并网带载运行时,其并网输出电流总畸变率 $\text{THD}=1.66\%$,符合并网要求。

结束语

实现大规模光伏发电是未来电网发展的重要目标,而目前的太阳能利用还只限于微电网模式。本文提出虚拟同步发电机控制策略,并配置储能装置,使系统对外表现为同步发电机的优良特性,在一定程度上可以解决大规模光伏发电中因环境变化和负荷波动带来的影响。应用虚拟同步发电机逆变技术,可使系统具有调压调频功能,而且控制算法中许多参数(如转动惯量、同步电抗等)不受工艺制造的限制,设置更加灵活,调节更加迅速,更利于提高系统的性能。最后,通过仿真实验验证了虚拟同步发电机思想的正确性、可行性以及配置储能装置对提高光伏发电性能的优越性。

参考文献

- [1] 王思耕. 基于虚拟同步发电机的光伏并网发电控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [2] 赵争鸣, 陈剑. 太阳能光伏发电最大功率点跟踪技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 27-43.
- [3] 葛艳华, 任晓刚, 邓元实, 等. 网侧变流器电压定向矢量控制分析与实验[J]. 电力电子技术, 2012, 46(8): 19-20.
- [4] 李洋. 基于虚拟同步发电机的微电网逆变器并联稳定性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2013.

(收稿日期: 2015-03-09) EA