

电力电子技术在可再生能源发电系统中的应用

徐建中¹, 冯遵安¹, 王恩荣²

(1. 南京化工职业技术学院, 江苏 南京 210048 2 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 电力电子技术作为可再生能源发电的关键技术, 直接关系到可再生能源发电技术的发展. 首先对太阳能光伏发电、风力发电、燃料电池发电及混合能源可再生能源发电系统进行了简述, 并对逆变器及并网控制技术、太阳能充电控制器、变速恒频风力发电系统、燃料电池功率调节系统及可再生能源发电系统中的谐波抑制技术等电力电子技术在可再生能源发电系统中的应用和发展趋势进行了详细的综述, 为可再生能源发电系统中的电力电子技术研究提供了有价值的参考.

[关键词] 可再生能源, 光伏发电, 风力发电, 燃料电池, 混合能源, 电力电子技术

[中图分类号] TM 61; TM 72 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2007)03-0021-05

Application of Power Electronics Technology in the Renewable Energy Generation Systems

Xu Jianzhong¹, Feng Zunan¹, Wang Enrong²

(1. Nanjing College of Chemical Technology, Nanjing 210048, China)

2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract The renewable energy generation technology is developing rapidly, and as the key technology of it, power electronics technology directly impacts its development. In this paper, solar photovoltaic generation, wind generation, fuel cell generation and hybrid renewable energy generation systems have been reviewed briefly. The inverter and grid-connected control technology, solar energy charger controller, variable speed constant frequency wind power generation system, fuel cell power conditioner system and harmonic suppression technology are studied, and the applications and development trends of power electronics technology in the renewable energy generation systems are reviewed, which provide a research aspect for power electronics technology.

Key words renewable energy, photovoltaic generation, wind generation, fuel cell, hybrid renewable energy, power electronics technology

0 引言

从目前世界的能源结构来看, 以资源有限、污染严重的石化能源为主的能源结构将逐步转变为以资源无限、清洁干净的可再生能源为主的能源结构. 太阳能、风能、水能、海洋能、生物质能、地热能、燃料电池等可再生能源作为新兴的绿色能源, 以其永不枯竭、无污染、不受地域资源限制等优点, 正得到迅速的推广应用^[1-2].

电力电子技术作为可再生能源发电技术的关键, 直接关系到可再生能源发电技术的发展. 可再生能源发出大小变化的直流电或频率变化的交流电, 需要电力电子变换器将电能进行变换.

1 电力电子技术在再生能源发电系统中的应用及发展趋势

1.1 可再生能源发电系统

可再生能源发电技术的发展和规模的扩大, 使其逐步从补充型能源向替代型能源过渡. 下面简介几种

收稿日期: 2006-12-17

基金项目: 江苏省六大人才高峰课题(06-A-045)资助项目.

作者简介: 徐建中(1953-), 副教授, 主要从事电机控制及电源技术的教学与研究. E-mail: zxsl8@njcc.edu.cn

通讯联系人: 王恩荣(1962-), 教授, 博士, 主要从事电气自动化等方面的教学与研究. E-mail: ewang@njnu.edu.cn

主要的可再生能源发电系统.

1. 1. 1 光伏发电系统^[3]

光伏发电系统可分为独立光伏发电系统和并网光伏发电系统. 图 1 是一个太阳能光伏并网发电系统示意图. 该系统由太阳能、光伏阵列、双向直流变换器、蓄电池或超级电容和并网逆变器构成. 光伏阵列除保证负载的正常供电外, 将多余电能通过双向直流变换器储存在蓄电池或超级电容中; 当光伏阵列不足以提供负载所需的电能时, 双向直流变换器反向工作向负载提供电能.

1. 1. 2 风力发电系统^[4]

风力发电按照风轮发电机转速是否恒定分为定转速运行与可变速运行两种方式. 按照发电机的结构区分, 有异步发电机、同步发电机、永磁式发电机、无刷双馈发电机和开关磁阻发电机等机型. 风力发电的运行方式可分为独立运行、并网运行、与其它发电方式互补运行等.

1. 1. 3 燃料电池发电系统^[5]

燃料电池是一种将持续供给的燃料和氧化剂中的化学能连续不断地转化为电能电化学装置. 燃料电池发电最大的优势是高效、洁净, 无污染、噪声低, 模块结构、积木性强、不受卡诺循环限制, 能量转换效率高, 其效率可达 40% ~ 65%. 燃料电池被称为是继水力、火力、核能之后第四代发电装置和替代内燃机的动力装置.

1. 1. 4 混合能源发电系统^[2, 6]

利用风能资源和太阳能资源天然的互补性而构成的“风力—太阳能混合发电系统”, 可以弥补因风能、太阳能资源间歇性不稳定所带来的可靠性低的缺陷, 在一定程度上提供稳定可靠电能.

“太阳能光伏制氢储能——燃料电池发电系统”的结构如图 2 所示.

作为可再生能源应用的重要组成部分的电力电子变换装置的研究与开发也成为一个重要的研究课题. 可再生能源发电中应用到的电力电子技术主要包括逆变器及并网技术、太阳能充电控制技术、变速恒频风力发电系统、燃料电池功率调节系统、谐波抑制和能量管理等.

1. 2 逆变器及并网控制技术^[7, 8]

可再生能源发电输出功率的并网主要采用针对变速恒频双馈风力发电机组的 AC—AC 变换器并网和采用逆变器的并网方式. 目前, 可再生能源发电的并网多采用逆变器与电网连接, 并网逆变器应具有功率因数为 1、网侧电流正弦化、能量可双向流动等特点, 从而使其具有优良的控制性能. 当光伏并网发电时, 并网逆变器还必须具有快速的动态响应. 逆变器除了要保证并网所要求的电能品质和条件外, 还要实现可再生能源发电技术的一些功能, 如太阳能最大功率输出跟踪控制和风能最大捕获控制等, 要求其主电路拓扑结构具有有功、无功功率解耦可调, 且有高的变换效率. 此外, 通过并网运行和独立运行两种模式的无缝切换技术, 可以减小对电网的冲击. 目前这方面的研究多集中在电路拓扑方面, 所采用的控制策略多为 PI 控制, 对外界环境不具备鲁棒性. 利用现代控制理论提高并网逆变器性能已有一些成果, 如采用非线性状态反馈线性化方法实现了线电流中的有功和无功分量的解耦控制, 达到了提高动态性能的目的; 在 PI 控制基础上, 引入预测控制, 也能改善控制器的动态性能, 并可减小直流侧缓冲电容的容量; 将滑模控制应用于风电机组的并网控制器中, 可实现低速下的可靠发电控制; 基于自抗扰控制器原理的并网控制器, 在动态性能和鲁棒性方面具有明显提高, 且容易实现. 以上研究虽然得出了一些研究成果, 但都是针对各个问题分别解决, 要得出实用性的技术成果, 应将功率跟踪控制、功率因数控制和输出电流波形控制等问题综合考虑, 研究出统一控制算法. 目前我国太阳能光伏发电系统仍以独立供电系统为主, 自主研发的并网逆变器存在系统运行不稳定, 可靠性低的弱点, 而且保护措施不全, 容易引起事故, 与建筑一体化等问题也没

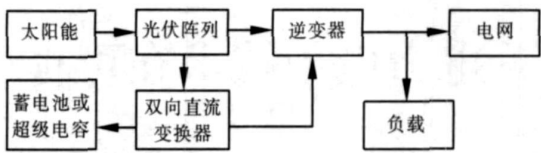


图 1 太阳能光伏并网发电系统
Fig.1 Photovoltaic grid connected generation system

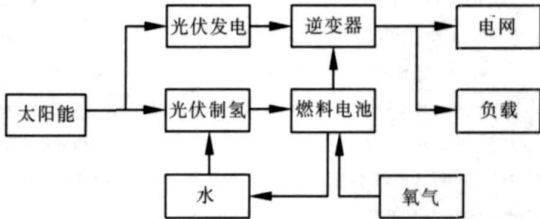


图 2 太阳能光伏制氢储能—燃料电池发电系统
Fig.2 Photovoltaic supplied hydrogen-fuel cell generation system

有得到很好考虑.

并网中的“孤岛”现象是指当电网失电后, 光伏并网发电系统与本地负载处于独立运行状态, 就会由太阳能并网发电系统和周围的负载形成一个自给式供电孤岛. “孤岛”现象会严重影响电力系统的安全正常运行, 危及线路维修人员的人身安全. 随着光伏并网发电系统及其它分散式并网电源的增多, 发生“孤岛”效应的概率也会越来越高, 近年来在可再生能源发展较快的国家和地区引起了人们的广泛重视. 一般情况下, 一个装有过压、欠压、过频和欠频继电器的逆变器具有对“孤岛”的基本保护功能. 但在源-负载功率平衡的情况下, 电压和频率变化很小, 这些继电器将失效, 导致系统进入“孤岛”运行. “孤岛”检测方法分为两大类, 即被动检测法和主动检测法. 被动检测是通过观察电网的电压、频率以及相位的变化来判断有无“孤岛”发生等. 然而当光伏电源的功率与局部电网负载的功率基本接近, 导致断电时局部电网的电压和频率变化很小时, 被动检测法就会失效. 为了解决此问题, 主动检测法应运而生. 主动检测法是通过在并网逆变器的控制信号中加入很小的电压、频率或相位扰动信号, 然后检测逆变器的输出. 当“孤岛”发生时, 扰动信号的作用就会显现出来, 当输出变化超过规定的门限值就能预报“孤岛”的发生. 但一般的主动检测法(如频率偏移法、输出功率变化测量法等)中, 负载相角特性对检测的有效性影响较大, 这类方法存在“检测盲区”. 如何快速、准确、低成本地进行“孤岛”检测与控制将成为并网技术的一个研究热点.

1.3 太阳能充电控制器^[9]

为提高太阳能发电的可靠性, 需配备一定容量的蓄电池组. 铅酸蓄电池组成本较高, 且使用寿命有限, 若使用不当, 会严重影响寿命. 蓄电池组的成本已成为影响太阳能光伏发电系统推广应用的一个主要障碍. 常规的充电方法, 如恒流充电法、阶段充电法、恒压充电法、脉冲充电法等, 都是基于蓄电池的充电特性曲线进行的, 但充电控制精度易受外界环境影响, 采用自适应控制算法则能很好地兼顾蓄电池充电控制和太阳能电池最大功率跟踪控制.

1.4 变速恒频风力发电系统^[4]

目前我国风力发电基本都是采用并网型异步风力发电机组, 运行方式是不加控制的直接并网运行, 风速风向变化时很容易对电网形成冲击、注入谐波、造成污染, 甚至影响局部电网运行的稳定性. 解决这一问题的方案是采用变速恒频控制, 即当风速改变引起风轮转速变化时, 仍能保证输出电能频率恒定. 实现变速恒频发电的方法众多, 其中双馈发电机方案最具优势. 双馈感应发电机又称交流励磁发电机, 其结构与绕线式异步电机相同, 定子侧三相对称绕组直接与工频电网相连, 转子侧三相对称励磁绕组要求与能提供可控幅值、相位及频率的电源相连. 由于交-交变换器只需供给转差功率, 大大减少了对容量的要求. 发电机根据风力机转速变化调节转子励磁电压频率, 实现恒频输出, 实现发电机的有功、无功功率独立调节, 进而控制发电机组转速实现最大风能的跟踪和捕获运行. 在风速变化的情况下实时地调节风力机转速, 使之始终运行在最佳转速上, 从而提高了机组发电效率, 优化了风力机的运行条件. 此外, 变速恒频风力发电系统在并网时, 几乎没有电流冲击, 不必担心异步机并网时冲击电流过大的问题. 同时, 双馈发电机工作频率与电网频率是彼此独立的, 当风轮及发电机的转速变化时, 也不必担心同步电机直接并网运行时可能出现的失步问题. 无刷双馈发电机的控制方案除了可实现变速恒频控制, 降低变频器的容量外, 还可以实现有功、无功功率的灵活控制, 对电网而言可起到无功补偿的作用. 同时发电机本身没有滑环和电刷, 既降低了电机的成本, 又提高了系统运行的可靠性.

变速恒频双馈发电系统的 AC-AC 变换器为四象限变换器, 按其拓扑结构可以分为交-交变频器、交-一直-交变频器和矩阵变换器. 交-交变频器不需中间直流滤波环节, 晶闸管采用自然换流方式, 始终吸收无功功率, 功率因数低, 谐波含量大, 输出频率低. 交-一直-交变频器是目前应用最广泛的 AC-AC 变换器, 但其直流环节的滤波电容体积大, 寿命较短, 且开关损耗较大. 目前应用的两种主要结构 AC-DC-AC 方式和 AC-AC 方式如图 3 所示.

矩阵变换器是一种 AC-AC 直接变频器, 由直接接于三相电源和三相负载之间的 9 个开关阵列组成, 没有中间直流环节, 功率电路简单, 可输出幅值、频率、相位和相序均可控的电压. 谐波含量较小, 输入功率因数可控, 可四象限运行, 但是其换流过程不允许两个开关同时开通或关断, 控制较复杂. 矩阵变换器作为发电系统交流励磁电源, 不但能满足交流励磁变速恒频发电所必需的双向功率流动, 而且其优良的输入、输出特性确保了生产满足要求的高质量电能, 同时在真正意义上解决了能源的最佳利用和环保问题. 目前

矩阵式变换器的控制多采用空间矢量变换控制方法,借用传统交—直—交控制策略,在鲁棒性和实现性方面还有待提高.

风力发电和电网兼容的问题也必须加以关注.如今的风力发电系统还不能适应较大的电网电压和频率暂态变化,当电网电压跌落时,风机脱离电网,而当电网稳定后风机重新并网运行.对于风机较少的电网来说,这是可以接受的,但是当风力发电量增长到电网容量的 10% ~ 15% 时,风力发电系统必须支持电网稳定,并且其行为必须和传统发电设备相似,这对发电系统提出了更为苛刻的要求.

1. 5 燃料电池功率调节系统^[10]

燃料电池是有内阻的,输出电压随着输出电流的变化而变化,这样的输出电压是不能直接应用的,并且输出电压随着温度的增加而增加.对于直流负载而言,一般只需一个恒定不变的供电电压,而对于交流

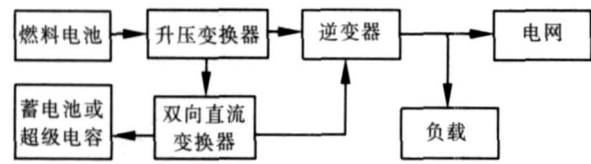


图 4 燃料电池并网发电功率调节系统

Fig.4 Fuel cell grid connected generation power conditioner system

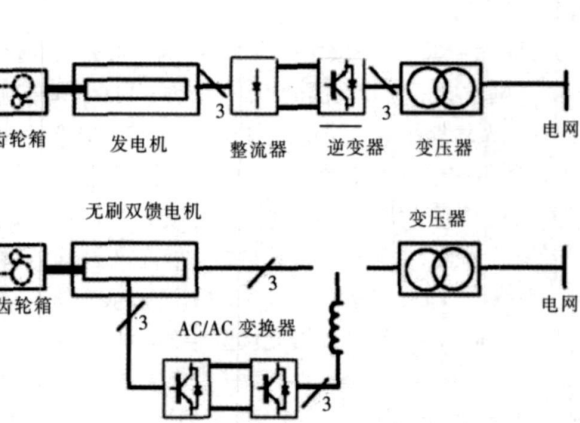


图 3 两种风能发电主要结构示意图

Fig.3 Construction sketch map of two kinds of wind power generation system

负载,还需要将直流电逆变为所需要的交流电,因此燃料电池的发电系统必须要有功率调节系统才能正常工作.燃料电池并网发电功率调节系统的结构示意图如图 4 所示,系统由燃料电池、蓄电池或超级电容、升压变换器、双向直流变换器和并网逆变器构成.由于目前燃料电池发电成本还比较高,因此对功率调节系统的转换效率要求较高.

针对燃料电池电源系统功率调节器输入电压变化范围宽,则需选用一种适用于宽输入的变换器拓扑作为该功率调节器的前级,此外还得考虑动态响应速度慢的特点.双向直流变换器研究的几个关键问题是: (1)如何研制简单高效的双向直流变换器拓扑; (2)探寻新型双向直流变换器的软开关技术,从而进一步降低变换器的开关损耗,并拓宽软开关负载适应范围; (3)减小双向直流变换器中的循环能量,降低通态损耗,提高总体效率; (4)进一步提高双向直流变换器的动态响应; (5)建立双向直流变换器的控制模型,有助于变换器的优化设计,改善变换器的性能; (6)实现双向直流变换器的数字控制,有利于进行系统移植、数据采集、显示和监控.

1. 6 可再生能源中的谐波抑制^[11]

可再生能源发电多采用电力电子装置来实现功率转换,通常会给电网带来电力谐波,使功率因数恶化、电压波形畸变、增加电磁干扰,随着可再生能源发电规模的增大,因而给电网带来的电能质量问题越来越受到关注.目前,谐波抑制主要有两种方法:无源滤波和有源滤波.无源滤波利用电容和电感谐振的特点来抑制特定频率的高次谐波分量和提高功率因数,但存在体积大、滤波频率固定和会出现串/并谐振等缺陷,限制了其应用场合.近年来,有源滤波以其可补偿各次谐波,还可抑制电压瞬变、补偿无功等一机多能的特点,成为一个研究热点,且在一些工业先进国家得到了大量应用,但在补偿性能、可靠性以及降低成本和损耗方面还有待进一步完善.针对有源滤波器的强非线性和高实时性要求,许多学者将先进控制技术应用于有源滤波器的控制,也取得了许多有益的结果.以上研究成果虽然可实现对有源滤波器品质的改善,但尚未成熟.另外,电源品质的改善应是综合性的多目标优化问题,应加强对统一电源品质的管理.

1. 7 其它

随着可再生能源发电技术的不断发展,对混合发电系统的能源管理,电力电子应用系统的集成化、模块化,并网运行的稳定性、容错与冗余,电能品质等提出了更高的要求,电力电子产业面临着良好的机遇和

严峻的挑战.

2 结束语

本文对可再生能源发电中太阳能光伏发电、风力发电、燃料电池发电和混合能源发电系统进行了介绍, 详细研究了电力电子技术在可再生能源发电系统中的应用和发展趋势, 新能源发电系统给电力电子技术提供了新的方向, 也为从事可再生发电能源系统的研究提供了新的思路.

[参考文献] (References)

- [1] Vlatkovic V. Alternative energy: state of the art and implications on power electronics[C] // Proc IEEE APEC, 2004(1): 45-50
- [2] Bull S R. Renewable energy today and tomorrow[J]. Proc IEEE, 2001, 89(8): 1 216-1 226
- [3] Gow JA, Manning C D. Photovoltaic converter system suitable for use in small scale stand-alone or grid connected applications [J]. IEEE Trans Electric Power Applications, 2000, 147(6): 535-543
- [4] Muller S, Deicke M, De Doncker R W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines[J]. IEEE Trans Industry Applications, 2002 8(3): 26-33
- [5] Ellis M W, Von Spakovsky M R, Nelson D J. Fuel cell systems efficient flexible energy conversion for the 21st century[J]. Proc IEEE, 2001, 89(12): 1 808-1 818
- [6] Kato N, Kurozumi K, Susuki N, et al. Hybrid power supply system composed of photovoltaic and fuel cell systems[C] // Proc IEEE Intell E C, 2001: 631-635
- [7] Tsukamoto T, Okayasu K, Yamagishi. Study on islanding of dispersed photovoltaic power systems connected to a utility power grid[J]. Solar Energy Proceedings of Solar Energy, 2001, 70(6): 505-511.
- [8] Jun Y in, Chang L inchen, Diluch C. Recent developments in islanding detection for distributed power generation[C] // Proc IEEE Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2004 124-128
- [9] Kjaer S B, Pedersen J K, Blaabjerg F. Power inverter topologies for photovoltaic modules: a review[C] // Proc IEEE IAS, 2002(2): 782-788
- [10] Schenck M E, Lai J S, Stanton K. Fuel cell and power conditioning system interactions[C] // Proc IEEE APEC, 2005(1): 114-120
- [11] Bimal K Bose. Energy environment and advances in power electronics [J]. IEEE Trans Power Electron, 2000, 15(4): 688-701.

[责任编辑: 刘 健]