

光伏逆变器 - 市场、技术和发展趋势

Solar Inverters-Market, Technology and Trends State of the Art to Future Trends

北京交通大学 贺明智 冯轲译

Bruno Burger Werner Roth

摘要: 光伏阵列和逆变器的市场正在以高达 40% 的年平均增长率迅猛发展。2007 年总的市场大约为 2.5GW, 而且在 2007 年年末的总装机容量将达到约 10GW。光伏逆变器将阵列输出的直流电流转化成交流电流, 并且反馈回电网。逆变器拓扑结构有三种基本形式: 带低频 (50/60Hz) 变压器的逆变器、带高频变压器的逆变器、无变压器的逆变器。无变压器的逆变器在欧洲市场上占主导地位, 市场份额约为 80%, 在日本市场上占有接近 50% 的份额, 而在美国由于国家标准的要求, 只能使用带变压器的逆变器。无变压器的逆变器的效率高达 98%。高效率的无变压器逆变器这是一个国际的发展趋势。随着技术发展, 通过采用中点钳位拓扑(NPC)和新型电力半导体器件材料如碳化硅, 将使得逆变器效率达到 98.5%。

1 光伏系统

根据功率等级需要的不同, 光伏(PV)系统的体积大小和应用情况可能有较大的不同。按照系统是否连接电网来看, 光伏逆变器可分为两个大类。

1.1 并网系统

并网系统可以再次分为两个类型。一是集中式系统, 将所产生的电能全部馈入电网; 二是分布式系统, 将所产生的电能提供给连网的当地用户或者馈入电网。

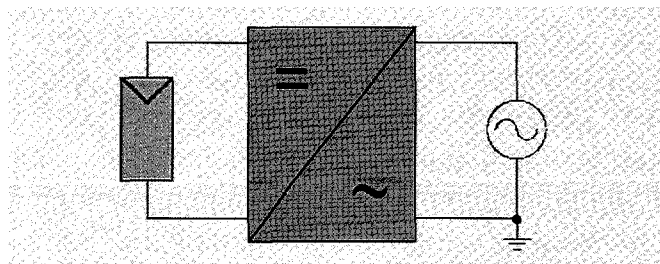


图1 带有光伏电池(蓝色), 逆变器(红色)和电网(黄色)的光伏联网系统

如图 1 所示, 在光伏并网系统中, 逆变器将光伏阵列产生的直流电流(DC)逆变成交流电流(AC)。通常这种

逆变器的变换效率——经常被称为“欧洲效率”, 通常在 95% 至 98%。直接接光伏阵列的逆变器带有最大功率点跟踪(MPPT)控制, 通过持续地调节负载阻抗使得光伏阵列可以输出其最大功率。可以用一个逆变器将所有阵列的电能输出进行集中逆变, 或是用分布式的小逆变器对不同的阵列的输出电能进行单独地逆变。

1.2 脱网光伏阵列

“离网”或“独立”系统可以分为三类: 工业领域的应用, 偏远乡村发展的应用和消费产品中的应用。

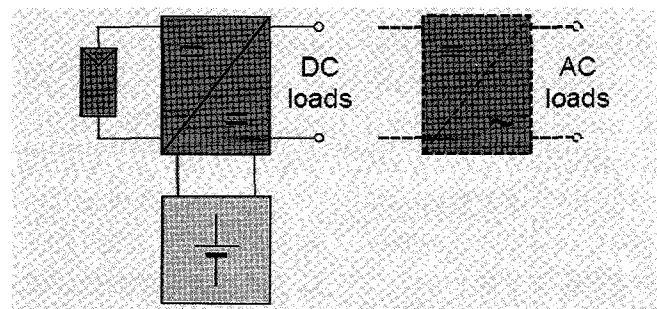


图2 带太阳能电池的离网光伏系统(蓝色), 充电器(绿色), 电池(灰色)和备选的逆变器(红色)

在离网系统中，需要储能电池在夜间和恶劣天气中为其系统提供电能。充电控制器(或是调节器)使电池保持在高的电荷状态(SOC)，并且在电池过放电或过充电的情况下为用户提供满足质量要求的电能。部分充电控制器也有最大功率跟踪控制，使光伏阵列的输出能量最大化。在需要提供交流电流的应用中，独立的逆变器可为交流设备提供电能。

2 光伏市场现状和前景

2.1 光伏市场现状

从2001年到2006年，全球光伏产业的年复合增长率是41%。2006年的需求在2005年基础上增长了41%。按保守的估计，2007年的需求将增长30%，如果按加速的估计可以达到42%^[1]。

图3是2006年的各种应用的市场份额。85%的光伏模块装置产品进入了并网装置(住宅用，商用和并网电站)。对并网发展的需求有多种引导因素(税收，生产和容量的需求，直接补助，和强制光伏上网电价)及财政解决方案例如购电协议(PPA)模式。

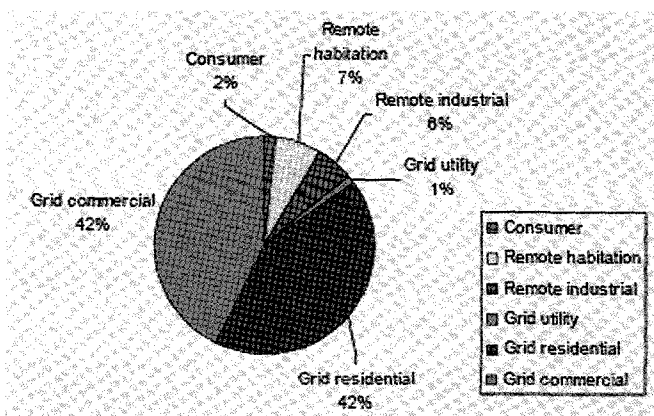


图3 2006年的各种应用的市场份额

德国在2006年仍然是最大的光伏市场，尽管在2007年它的份额下降了五个百分点，但在2007年德国仍很可能是最大的光伏能量消费国。在2006年，光伏市场排名前五的国家分别是：德国(50%)，日本(21%)，美国(11%)，印度(3%)和西班牙(3%)。据预测，在2007年排名前五的国家分别是：德国(45%)，日本(18%)，美国(12%)，西班牙(6%)和中国(4%)，如图4所示。

图5是至2006年的全球光伏容量。根据杂志《光学国际》的分析，在2006年年底，德国电网上至少有2774兆瓦的光伏系统。这就意味着光伏系统总共提供了2214兆瓦时的电能，占德国全部电能消费的0.42%。

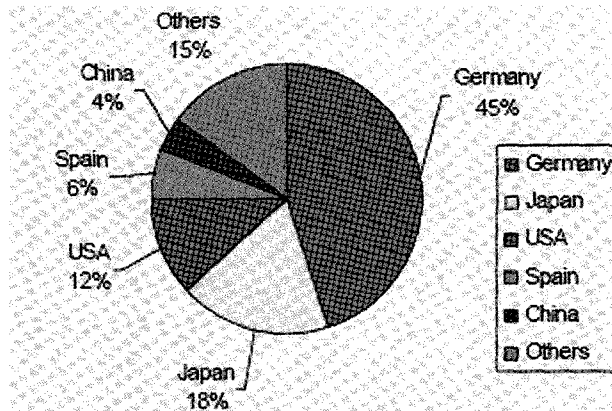


图4 2007年预期国家市场份额

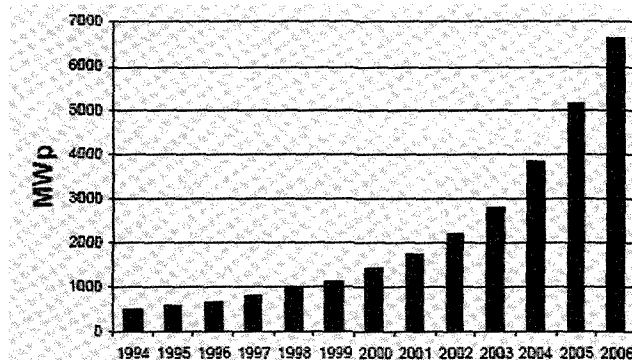


图5 全球累计光伏容量

2.2 光伏市场增长前景

附表是从2007年到2011年对光伏应用前景的预期。其中，远程工业品应用增长率约为13%，远程居民生活应用为18%，具有更高的复合年均增长率为并网住宅(45%)，商业并网电站(46%)和并网应用设备(52%)。总的来说，五年内的预期为年复合增长率43%。

附表 2007至2011年五年前景展望

	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Consumer power	23	26	28	32	36	40
Consumer indoor	9	10	11	11	12	13
Remote habitation	134	161	193	228	267	312
Remote industrial	111	124	139	157	178	204
Grid utility	22	40	59	66	128	180
Grid residential	837	1206	1786	2678	3884	5437
Grid commercial	848	1246	1845	2789	4012	5617
Total demand	1985	2813	4061	5962	8516	11801

图6是在2006年整个光伏模块需求展望以及至2011年的增速前景预测。

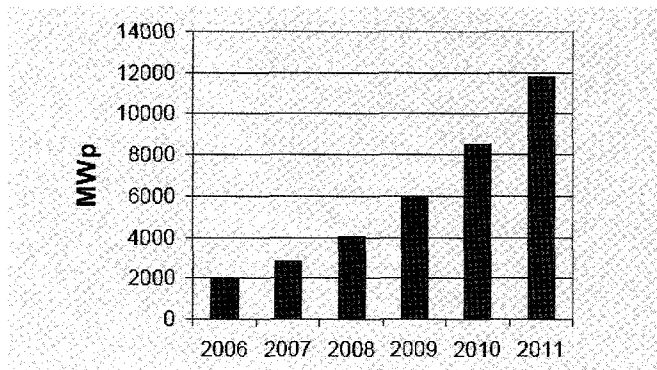


图6 2006年的总需求以及2007至2011的光伏应用前景预测

2.3 光伏发电的价格

光伏阵列的价格依赖于全球市场的增长。图7是光伏应用价格的经验曲线。在模块价格和功率的双对数坐标系中，比例因子约为0.8。2007年的价格有望下降到接近4欧元/瓦，到2010年时接近2欧/瓦。图8是光伏发电价格和普通电网电价的比较。在西班牙，光伏系统的发电率为1800kWh/(kWh*a)，光伏发电的价格接近0.2欧每千瓦时，与公用电网的电价相当。在德国，只有900kWh/(kWh*a)，因此光伏电能的价格将在2020年与公用电网价格相当。

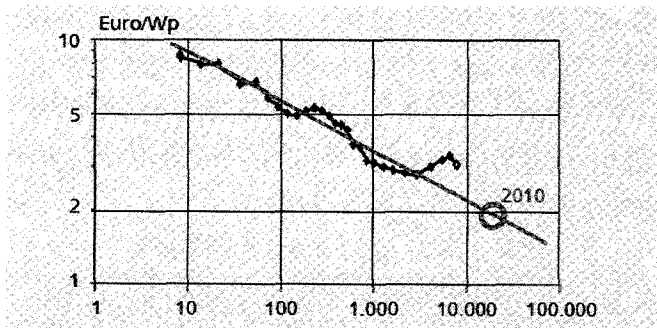


图7 光伏应用的经验曲线

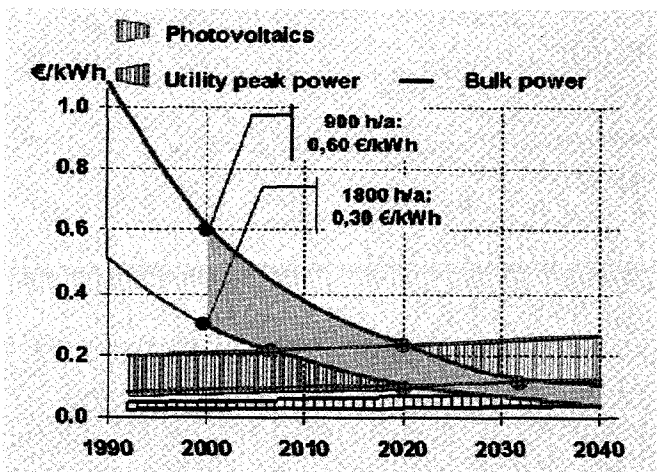


图8 光伏发电的价格和公用电网电价的竞争力比较

3 光伏逆变器的拓扑

目前，市场上有超过40种不同类型的逆变器^[6]。本文中只介绍最常用的一些类型。所有的开关管被假设成理想开关器件。在实际应用中，将使用MOSFET和IGBT，但为了图示简单，省掉了反并联二极管。

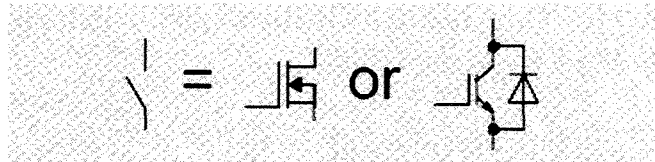


图9 理想开关管等效于有内部二极管的MOSFET或IGBT

3.1 带有工频变压器的逆变器

最先得到使用的逆变器拓扑是单相带工频(50/60Hz)变压器的结构。它在直源侧含有源及无源器件，通过工频变压器与电网进行隔离连接(如图10)。在初始阶段，逆变器主要用于低压的应用中，如48V或120V，并且以MOSFET作为开关。如今，IGBT得到大量的应用，电压等级也提高了几百伏。

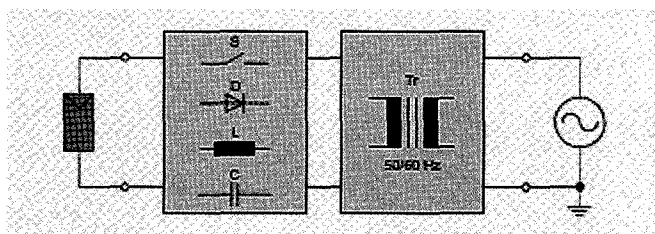


图10 带工频变压器的逆变器

图11是个最常用的带工频变压器的单相逆变器。它包括了4开关的全桥电路，后面接一个或者两个电感并且采用PWM技术将电压调制成正弦波形。

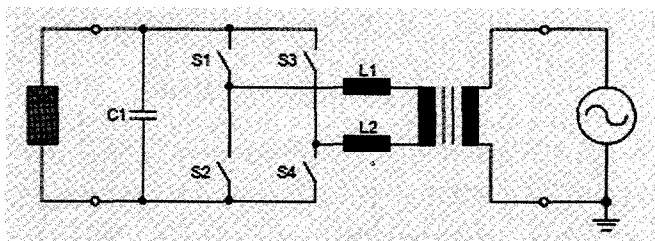


图11 带50Hz/60Hz工频变压器的单相逆变器

变压器有约2%的损耗，所以最大功率的范围为94-96%。由于变压器的典型重量比为10kg/KVA，所以此类逆变器比较重。由于太阳能发电装置与电网隔离，因此可以将它接地。在美国，必须满足直流侧接地的要求，因此这点对美国市场的应用来说是非常重要的。对于薄膜型阵列而言，推荐使用负极接地的方式。对于单晶硅后连电池(EWT 电池)，如太阳能电池，推荐使用正极接地。

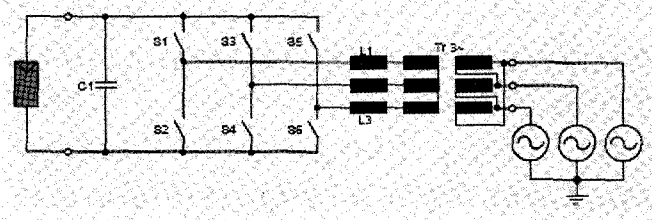


图12 带工频(50/60Hz)变压器的三相逆变器

大多数功率等级在30kW到1MW的集中式逆变器都是带工频变压器的三相逆变器(见图12)。很多厂商采用UPS逆变器电路,只是将控制单元进行替换。此类逆变器的频率一般为94%到97%。

3.2 带高频变压器的逆变器

在同等功率条件下,带高频变压器的逆变器比带工频(50/60Hz)变压器的逆变器更轻。它通过直流侧的有源和无源元件产生高频的矩形或正弦电压。此电压由高频变压器升压。在电网侧,有源及无源器件将高频电压调制成交流电压。

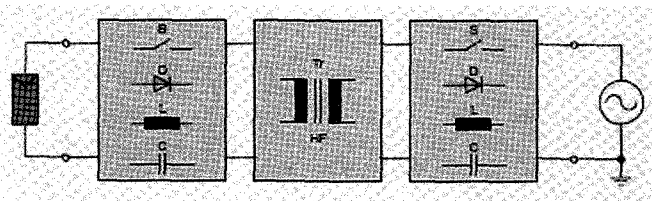


图13 带高频变压器的逆变器拓扑结构

图14是带高频变压器的逆变器。四个开关管S1-S4产生高频的矩形波,并通过高频变压器传递。在副边,二极管D1-D4整流,并且经过电感L1滤波。直流侧电容C2对电压滤波,其工作电压比电网电压幅值高约50V,如230V电网系统中的直流电压约为375V。开关管S5-S8通过脉宽调制进行调制成正弦电流并通过电感L2和L3馈入电网。

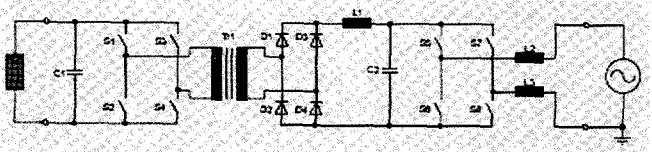


图14 带高频变压器的逆变器

上述方案中,二极管D1和D4需要满足很高的耐压要求。此类高压二极管需要较长的恢复时间,因而导致效率降低。在此电路中,电流必须通过六个半导体器件。这个意味系统存在较高的导通损耗,降低了效率,通常的效率约为95%。

图15的方案中二极管耐压要求比前面方案中的二

极管耐压要求低一些,因为电感输入侧,二极管上的电压被直流母线的电压箝位。此方案的效率约为95%。

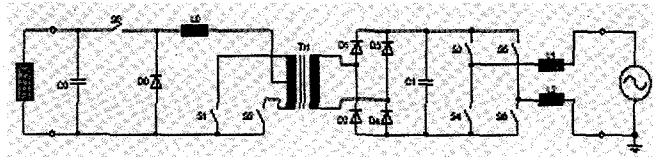


图15 供给高频变压器的逆变器

采用如图16所示的反激式方案,可以大大降低开关器件的数量。此方案的变压器更复杂,因为需要很高的耦合系统和低杂散电感,以此防止开关器件上的过电压。

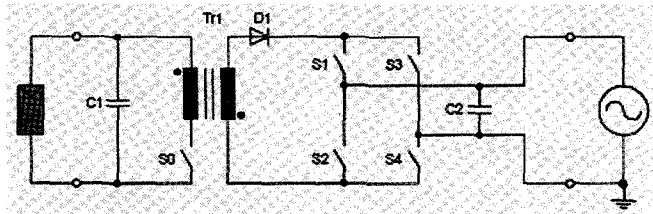


图16 带反激式变压器的逆变器

3.3 无变压器的逆变器

大多数光伏阵列是根据安全等级II生产的,变压器不是必需的。此类逆变器需要的有源器件包括IGBT和二极管和滤波器件包括电容和电感(见图17)。

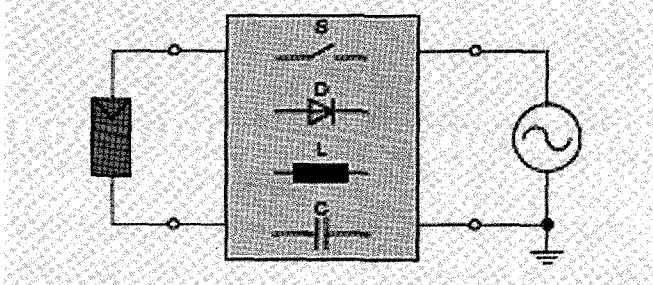


图17 无变压器的逆变器的典型拓扑

无变压器的逆变器与带变压器的逆变器相比有以下优点:更高的效率、更低的质量和更便宜的价格。除此之外,安全机制例(如隔离电压测试等)的测试也比带变压器的逆变器更加简单。

图18是一个无变压器的逆变器只使用一个全桥电路,由四个晶体管构成。该逆变器需要输入电压一直要高于电网的峰值电压,如230V的电网电压需要360V的输入电压。据报道,电路非常简单而且便宜,效率可以达到97%。

通过加入如图19所示的前级升压变换器,可以降低对输入电压的要求。在某些应用中,通过将两个或三个升压变换器并联的方式给母线供电,此时可以实现对不同的光伏阵列输出进行连接,并分别实现最大功率点的跟踪控制。通常,升压变换器的最高效率为98%,

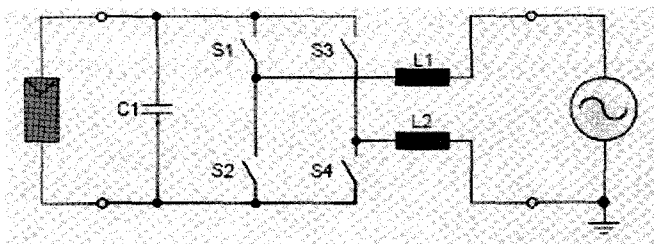


图18 无变压器的逆变器(H4桥)

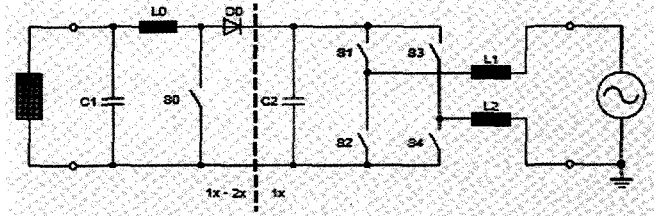


图19 H4桥和BOOST变换器构成的无变压器的逆变器

而总的变换效率约为95%。

通过零电压工作方式，可以降低开关和电感上的损耗。此类应用中的第一种电路就是HERIC拓扑。它使用了两个辅助开关，通过D1、S5以D2、S6作为电感续流回路(见图20)。在续流过程中，四个开关S1-S4同时关断，此时光伏阵列处于悬空状态。

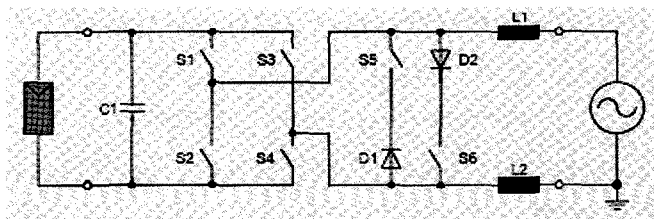


图20 HERIC逆变器

H5拓扑中，当S0、S2和S4关断时将太阳能发电系统断开(见图21)，此时使用开关S1和S3作为续流回路。

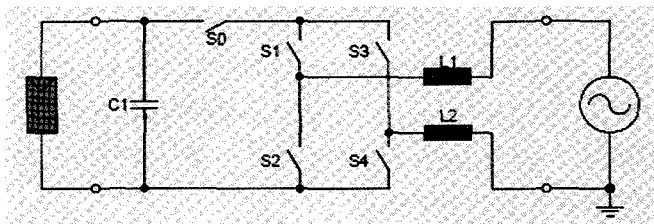


图21 H5逆变器

这两个电路在性能上是基本相似，效率高达98%。

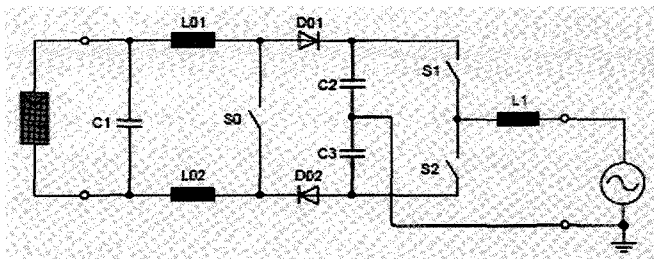


图22 带有对称升压变换器、分裂直流母线电容的逆变器

图22中的逆变器使用一组对称的升压变换器，有两个电感和两个二极管，得到对称的直流电势。两组直流电源的公共点是地线，对于并网系统而言，只需要一支桥臂。该电路有一定的不足，因为其需要较多的电解电容。因为没有零电压开关，其效率约94%到96%之间。

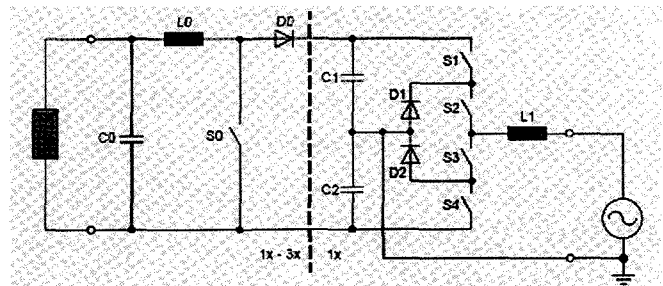


图23 升压变换器和一个三电平支路

图23所示的方案中有三电平支路，并能实现零电压工作，因此可以得到比图22所示的方案更高的效率。此电路也受限于需要较大的直流母线电容，有一定的不足。

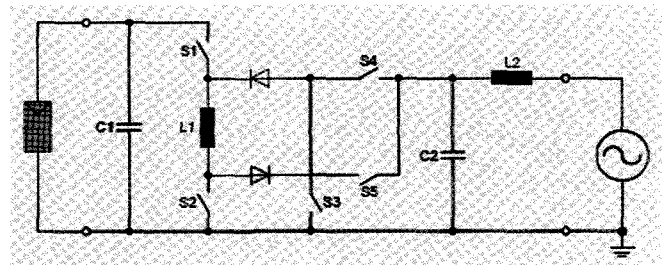


图24 Karschny逆变器

根据一些国家的法规，太阳能发电设备的一端必须接地。由于存在短路的可能性，因此对于大多数无变压器的逆变器来说是不可能实现。图24所示的Karschny电路设计是采用负极接地的方式。这种电路的缺点是需要较多的半导体模块串联、电感上有较高的纹波，并需要加电容滤波。

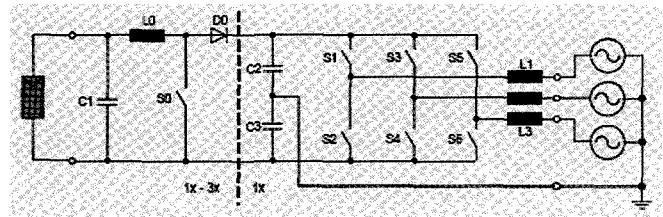


图25 带分裂直流电容三相逆变器

在许多国家的法规中，单相并网逆变器的最大功率限制是5kW。如果需要更大的功率则需要使用三相并网系统。图25是一个带直流侧分裂电容的三相逆变器。因为三相桥至少需要700V的电网电压，因此需要一个或多个升压变换器提升较低的输入电压。

3.4 效率

逆变器的效率和逆变器的电力电子电路的拓扑结构密切相关。HERIC 和 H5 拓扑可以达到最高的 98% 的效率, 这两个电路有续流回路。常规的无变压器的逆变器的效率大约比前面的方案低约 1%。根据带工频变压器的逆变器输出功率及电路结构的不同, 此类逆变器的效率通常在 94% 到 96% 范围内。

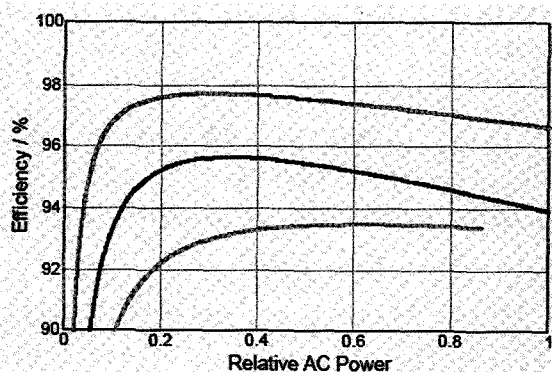


图 26 逆变器的效率曲线: HERIC 逆变器 (红色), 带有 50/60Hz 变压器的逆变器 (蓝色) 和带有高频变压器的逆变器 (绿色)

逆变器的效率与直流侧输入电压也有关系。图 27 是直流电压与无变压器逆变器的效率之间的关系。当直流电压接近 350V、负载约 1.5kW 时, 系统的效率最高。在最大输入电压 700V 情况下工作时, 效率要低约 1%。

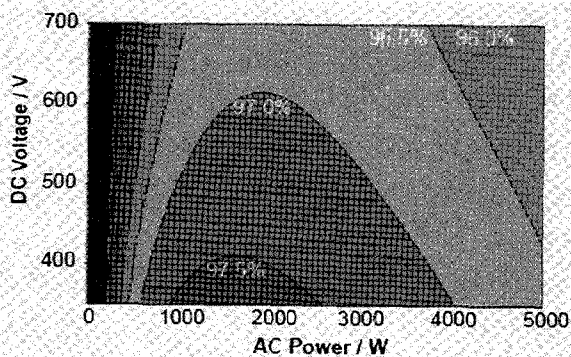


图 27 直流电压与无变压器逆变器功率的关系

4 趋势

4.1 光伏模块的趋势

总体上来说, 光伏系统的发展趋势是具有更高的效率, 以此来节省费用和土地使用。目前, 市场上占主导地位的是单晶硅产品。为了满足更高效率的要求, 通常采用一些特殊的电池生产技术。薄膜阵列模块在竞争中将获得一定的市场份额, 但也需要在更高效率和更长的使用寿命方面取得更多的发展, 以此与多晶硅电池进行竞争。

4.2 光伏逆变器的趋势

光伏逆变器最初的功率等级是约 1kW。现在大多数系统是 5kW 或更高的功率等级。单项逆变器的功率已经达到 11kW, 三相逆变器的功率已经达到 30kW。逆变器的功率等级将向更大的方向发展, 效率也将向更高的方面发展。HERIC 逆变器、单项或三相的 H5 逆变器及中点钳位(NPC)的三相逆变器将赢得一定的市场份额。在 2007 年, 逆变器的最大效率为 98%, 2010 年为 98.5%, 在 2015 年将达到 99%(见图 28)。

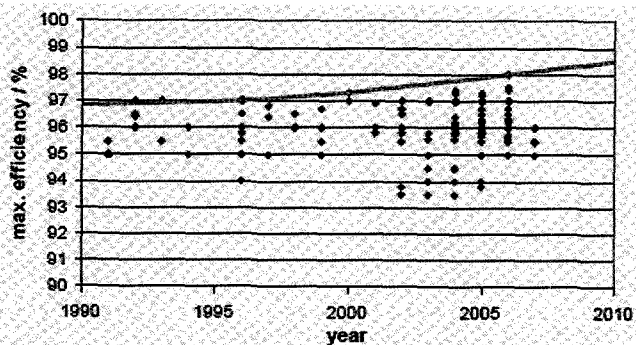


图 28 从 1990 年来光伏逆变器最大功率和趋势

为了得到更高的效率, 采用无变压器的拓扑的趋势将得到继续发展。对于一些必须采用变压器或阵列接地等标准的国家而言, 需要对标准进行修改, 以满足无变压器逆变器市场发展的需要。

现在, 光伏系统中的集中型逆变器多数是采用 UPS 的结构。此类逆变器比专门设计的光伏逆变器的效率约低 2%。因此, 市场的发展更趋于选择专门为光伏系统设计的逆变器。

所有新开发的逆变器项目中, 其目标是具有至少 20 年的寿命并降低价格。中期研究目标是通过控制无功和滤除谐波来提高电网的电能质量。

4.3 系统技术的趋势

目前所采用的屋顶发电系统将更多地趋向于光伏电站方向发展, 功率等级将从兆瓦到几百兆瓦。这些电能馈入中压和高压电网。电网在一定程度上也将得到发展, 分布式电网也是一个应用趋势, 光伏电站可以在一些大城市进行安装, 所产生的电能就地被消费。

5 展望

汽油和天然气资源有限, 并且由于二氧化碳问题使得全球变暖日益严重, 大力发展风能和光伏等清洁能源是形势所需。预计在未来 20 年到 50 年内, 光伏市场的

(下转第 25 页)

文所述不平衡控制策略的独特之处。

7 结论

在电网不平衡情况下,本文基于网侧为单位功率因数及负载电压为给定值的两个控制目标,给出了网侧电流给定方程。鉴于PWM整流器在正负序坐标系下电流变量不可解耦的问题,本文通过分析提出了一种不平衡坐标变换的方法,实现了网侧电流变量的解耦,同时给出了PWM整流器的解耦模型。基于所得到的解耦模型,本文采取输入-输出线性化的控制思想对PWM整流器的控制器进行设计,并进行了仿真实验。仿真结果表明,基于不平衡坐标变换所得到的解耦模型设计的控制器能够实现对PWM整流器的有效控制。

参考文献

- [1] Hong-seok Song, Kwanghee Nam. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [2] Rioual P, Pouliquen H, Louis J P. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 1996, 11(3): 495-502.
- [3] Hong-Seok Song, In-Won Joo, Kwanghee Nam. Source voltage sensorless estimation scheme for PWM rectifiers under unbalanced conditions[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2003, 50(6): 1238-1245.
- [4] Wu Xinhui, Sanjib K. Panda, Xu Jianxin. Supply-side current harmonics control of three phase PWM boost rectifi-

ers under distorted and unbalanced supply voltage conditions [C]. Proceedings of IEEE PEDS, 2007: 647-652.

[5] Stankovic A V, Lipo T A. A generalized control method for input-output harmonic elimination for the PWM boost type rectifier under simultaneous unbalanced input voltages and input impedances[C]. Proceedings of IEEE PESC, 2001: 1309-1314.

[6] Yongsug Suh, Tijeras V, Lipo T A. A nonlinear control of the instantaneous power in dq synchronous frame for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced operating conditions[C]. Proceedings of 37th IAS Annual Meeting., 2002, 2: 1189-1196.

[7] Yongsug Suh, Tijeras V, Lipo T A. A control method in dq synchronous frame for PWM boost rectifier under generalized unbalanced operating conditions[C]. Proceedings of IEEE PESC, 2002: 1425-1430.

[8] Yongsug Suh, Lipo T A. Control scheme in hybrid synchronous stationary frame for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced operating conditions[J]. IEEE Trans. Industrial Applications, 2006, 42(3): 825-835.

[9] Yongsug Suh, Lipo T A. Modeling and analysis of instantaneous active and reactive power for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced network[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2006, 21(3): 1530-1540.

[10] Ana Vladan Stankovic, Thomas A. Lipo. A novel control method for input output harmonic elimination of the PWM boost type rectifier under unbalanced operating conditions[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2001, 16(5): 603-611.

(上接第11页)

年增长率将达到20%到40%。未来5年到10年内,在当地光照强度等条件满足要求的情况下,光伏能源将达到可以和常规能源竞争的水平。根据图7的经验曲线,未来的价格将会下降。当他们足够低时,市场将会发生一些变化,将从工业化国家转移到发展中国家。离网系统和储能系统将显得越来越重要。

参考文献

- [1] Mints, P.; Sunny outlook, Predictions for growth in the PV industry, RENEWABLE ENERGY WORLD, September-October 2007, Volume 10, Number 5, PennWell International Pub-

lications Ltd., pp. 65-70

[2] Solar Generation IV 2007, Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020, European Photovoltaic Industry Association EPIA & Greenpeace, 2007

[3] PHOTON International, December 2007, Solar Verlag GmbH, Aachen, Germany, pp. 32-33

[4] PSE GmbH, Germany, 2007

[5] RWE Energie AG and RSS GmbH, Germany

[6] Burger, B.: "Power Electronics for Grid Connected Photovoltaics"; Seminar Power Electronics for Renewable Energies; OTTI Energie Kolleg, Freiburg, Germany, 19.-20.06.2007