

实现高效率低噪音的联网逆变器

邓隐北, 王光红, 孙培淦 编译

江西赣州诚正电机有限公司

摘要: 本文阐述了用于光伏发电的高效率, 低噪音联网逆变器的开发, 提出了输出钳位电平方式的独自控制方法。结果, 逆变器中的损耗从75.6W减少到39.8W, 约削减49%, 转换效率达到98%。噪音比原来减小17.6dB, 运转时的音压28.8dBA。今后如采用SiC和GaN高速功率器件, 则会进一步的高效率化。预计将本技术配置在功率调节器的系列产品上, 这将愈益广泛取得更大的节能降噪效果。

关键词: 光伏发电, 逆变器, 输出钳位电平方式, 转换效率, 损耗, 噪音

1 前言

近年来, 光伏发电系统和蓄电池系统等发电蓄能有关产品, 随着系统价格的降低和受到可再生能源扩大政策的影响而在不断普及。光伏发电系统的特点是, 只要有太阳照射, 系统正常可以发电, 不会出现停电现象。蓄电池系统的特点则是, 可以利用太阳电池的剩余发电以及廉价的深夜电力蓄能。为了将这些发电蓄能充分利用于住宅中的电气化设备, 将直流转换成交流并能调节功率的设备为功率调节器(以下简称PCS), 转换时会出现功率损耗。特别是进行DC/AC转换的逆变器(inverter)中的功率损耗, 约占整个损耗的75%。而且由于逆变器开关频率的影响, 会产生妨碍听力的运转声音, 故要求实现低噪音化。此外, 为功率调节器与系统连接, 必须满足联网规程规定的保护功能。要解决这些课题, 对同时实现高效率化和低噪音化的自主逆变器控制技术进行了开发。

2 课题的认识

2.1 功率调节器的内部结构和功率损耗

作为一个例子, 太阳光的功率调节器内部结构如图1所示。光伏发电的功率调节器, 将太阳电池的输出通过输

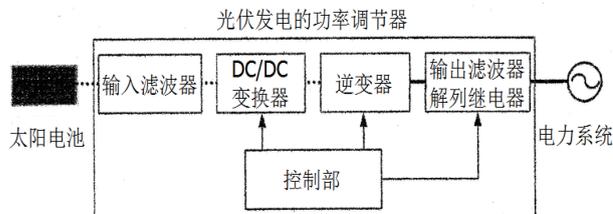


图1 光伏发电的功率调节器

入滤波器滤除噪音, 经DC/DC变换器转换成稳定的中间电压以后, 再在逆变器中由直流转换成交流, 通过输出滤波器、解列继电器, 最后向电力系统输出。控制部, 相应于太阳的辐照量以得到最大功率的方式, 对DC/DC变换器控制的同时, 对逆变器也进行控制。

本公司光伏发电的功率调节器, 在输出2KW时方框图中各部的功率损耗如图2所示。全部功率损耗(100.9W)之中, 逆变器产生的损耗为75.4W(约占75%)。

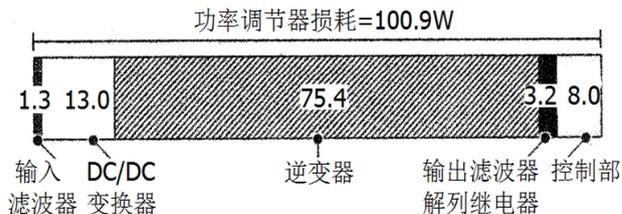


图2 方框图中各部的功率损耗

2.2 逆变器损耗的主因分析

原来方式的逆变器(以下简称原来方式)电路结构与输出波形如图3所示。

原来方式中, 通过Q1~Q4 4个开关的on/off(通/断)控制, 由交流电抗线圈(reactor)对输出电压 V_{out} 进行了脉宽调制(PWM), 使得电流平稳化而得到近似于正弦波的输出电流波形。

逆变器中, 组成开关的半导体(IGBT和二极管)与使其平稳化的交流电抗线圈均会产生功率损耗。由于流过的电流与阻抗成分会产生导通损耗以及开关通/断时会产生开关损耗。图4所示为原来方式的损耗细目。

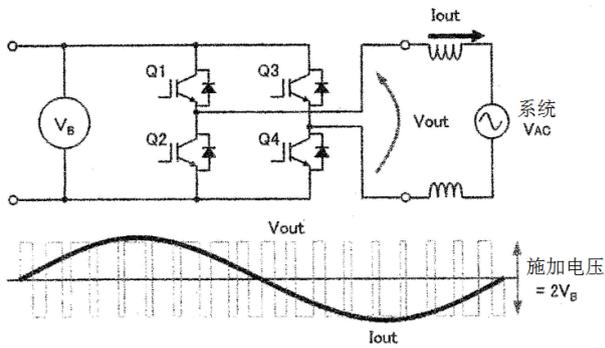


图3 原来方式的电路结构和输出波形

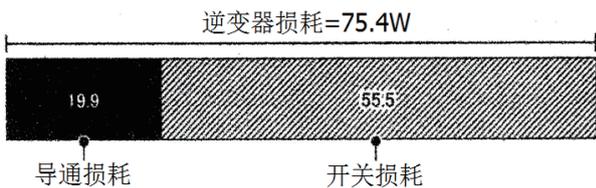


图4 原来方式的损耗细分

2.3 功率调节器的运转声音

功率调节器妨碍听觉的运转声音，是交流电抗线圈中的磁性材料由于磁致伸缩产生的振动。因磁致伸缩的振动与逆变器的开关操作是同期的。原来方式，设定开关的频率为可听域内的18KHz以上，运转时的音压为46.4dBA。图5所示为原来方式中开关频率与效率的关系。

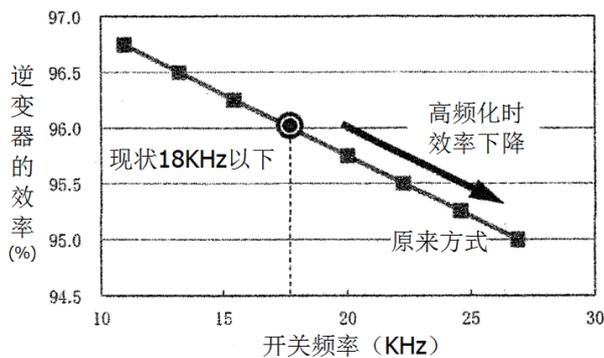


图5 原来方式的开关频率与效率

3 高效率逆变器方式的脱颖而出

3.1 多电平方式的逆变器

根据2.2节所述逆变器损耗主因分析的结果，提高转换效率可有效降低开关损耗。因此，对能减小逆变器开关频率与电抗器施加电压的多电平方式，进行了调查，调查

结果列于表1。

表1 多电平方式的逆变器调查结果

控制方式	双极性(bipolar)方式 (原来)	输出钳位电平 (clamp)方式	中性点钳位电平方式 (Neutral-Point-Clamped)
结构			
输出电压 Vout波形			
输出电平	2电平	3电平	5电平
开关	4个	6个	8个

对本次开发达到的所有逆变器的品质项目与目标值进行了设定。变换效率的目标值以小型化目标设定。为达到功率调节器运转时音压35dBA目标值所必需的频率，作为开关频率的目标值。按照日本电机工业协会规格JEM1498规定的，实现功率调节器单独运转检测功能所必需的值，设定了无功电流的输出值。而相应于联网规程具有一定的余量(margin)，则设定了漏泄电流、电流畸变率的目标值。进一步用电路模拟器(simulator)PSIM，对各种逆变器方式制作了模拟操作的模型。对应于已设定目标值的逆变器性能进行评价。品质项目、目标值以及评价结果列于表2。

表2 模拟模型的评价结果

品质项目	目标值	原来方式	输出钳位电平方式 (原来控制方法)	NPC方式
逆变器转换效率 (2KW)	97.5%以上	×	○	○
开关频率	20KHz以上	×	○	○
漏泄电流	0.70mA以下	○	○	×
无功电流输出	电流相位差 ±30°	○	× → 研讨	○
电流畸变率 (综合)	4.5%	○	○	○

评价的结果已了解清楚，各种方式均有待研究的课题，没有哪种方式能全部满足目标值。为此，对有关各种方式的课题进行了详细的研讨。NPC方式的漏泄电流，逆变器输出电压的共模(commonmode)电位，因为振动的原理而产生。为解决这一课题，必须采用变压器输入输出之间的绝缘分离。因伴随着变压器大幅度的效率下降和成本的增加，NPC方式不能够采用。因而输出钳位电平方式的无功电流输出的课题备受关注，对无功电流输出成为可能的控制方法进行了研讨。

3.2 无功电流输出的必要条件

按日本工业协会规格 JEM1498 规定的单独运转检测, 无功电流输出就是为实现这一单独运转检测的功能。因无功电流是与系统电压存在相位差的电流, 逆变器可能输出任意相位的电流, 则无功电流输出是可能的。要控制任意相位的电流输出, 不取决于系统电压与输出电流状态, 而是必须控制所要求的输出电压。也即, 不按照系统电压与输出电流 I_{out} 的符号而可以控制逆变器输出电压 V_{out} , 这就是无功电流输出成为可能的必要条件。

3.3 输出钳位电平方式原来控制方法的课题

对输出钳位电平方式原来控制方法的有关无功电流输出的课题进行了分析。图 6 所示为输出钳位电平方式原来的电路结构及控制波形。

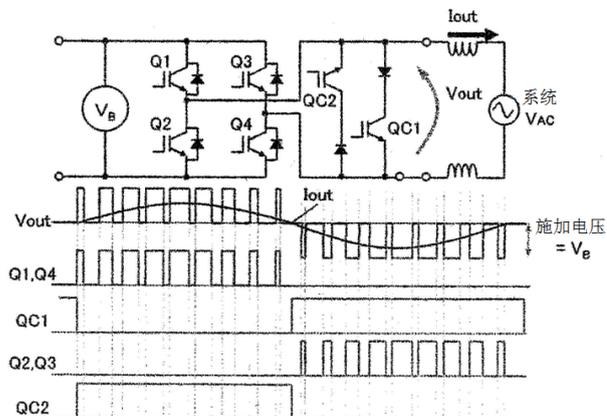


图 6 输出钳位电平方式原来控制的结构与控制波形

输出钳位电平方式原来的控制方法中, 系统电压的每个半周期进行切换操作。在系统电压正的半周期 $Q1/Q4$ 接通时逆变器输出电压 V_{out} 为 V_B ; $Q1/Q4$ 断开时通过接通的 $QC2$ 电流流通, 输出电压 V_{out} 钳位 (固定) 于 $0V$ 。从而开关元件的施加电压为原来方式 $1/2$ 的 V_B , 达到了开关损耗削减的效果。图 7 所示为输出钳位方式原来控制方法中, 系统电压与输出电流 I_{out} 存在相位差的无功

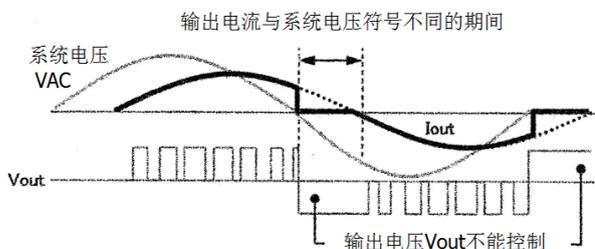


图 7 输出钳位电平方式原来控制方法中无功功率输出的课题

电流输出时的波形。在系统电压与输出电流符号不同的期间, 输出电压 V_{out} 不能用开关来控制形成固定的。结果, 在这一期间输出电流将接近于 $0A$ 。图 7 电流为超前相位的场合, 而滞后相位的场合也产生同样的课题。由此可见, 输出钳位方式原来控制方法中的逆变器, 不能满足无功电流输出的必要条件。

3.4 输出钳位方式的独自控制方法

为了解决输出钳位电平方式原来控制方法中的课题, 考虑提出了新的独自控制方法, 控制波形示于图 8。而且, 这一独自控制方法具有 3 个模式, 各个模式中的开关状态分别示于图 9。最大的特点是: 钳位电平时 (图 9 的模式 3), 钳位部的 2 个开关 ($QC1$ 、 $QC2$) 双方都接通。由此与输出电流 I_{out} 的符号无关, 钳位时能在钳位电路上流过电流, 输出电压 V_{out} 能控制在 $0V$ 。 $Q1/Q4$ 接通的模式

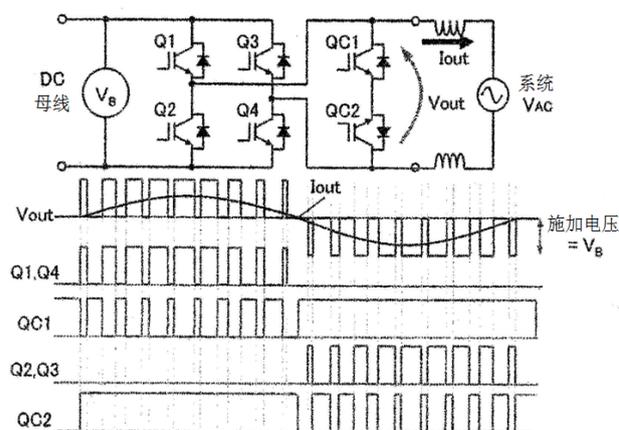
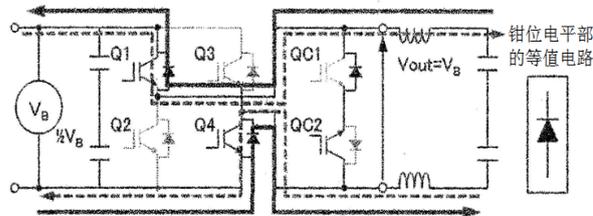
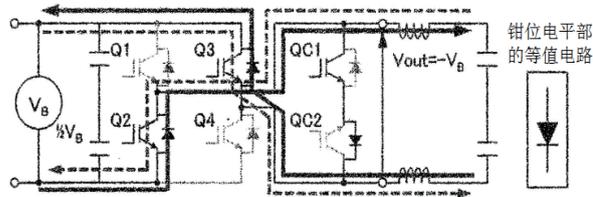


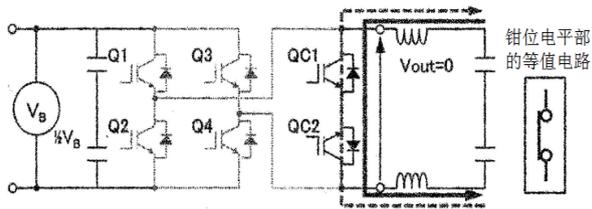
图 8 输出钳位方式独自控制方法的结构与控制波形



(a) 模式1 $V_{out} = V_B$



(b) 模式2 $V_{out} = -V_B$



(c) 模式3 $V_{out} = 0$

图9 输出钳位方式独自控制方法结构3个控制模式

1中 $V_{out}=V_B$, Q2/Q3 接通的模式2中 $V_{out}=-V_B$ 。从而, 这一独自控制方法, 系统电压与输出电流 I_{out} 无依存关系可以控制输出电压 V_{out} , 满足无功电流输出的必要条件。

3.5 由开关的高频化降低噪音

人们感觉的听力, 即使在相同的音压水平也会因频率的差异而不同。对于噪音的测定, 考虑到人们的听觉采用了A特性补正值。原来方式下, 将开关的频率实现高频化, 开关损耗增加, 转换效率大幅度下降。但由于这次的输出钳位方式与独自控制方法, 逆变器中因施加电压减半, 开关损耗能大幅度降低, 一方面保持高的转换效率, 一方面能使开关频率比原来还高的高频化。按照音压目标和转换效率目标, 开关频率已设定为20KHz。

图10所示为输出钳位方式独自控制方法与原来方式中的开关频率与转换效率的关系。

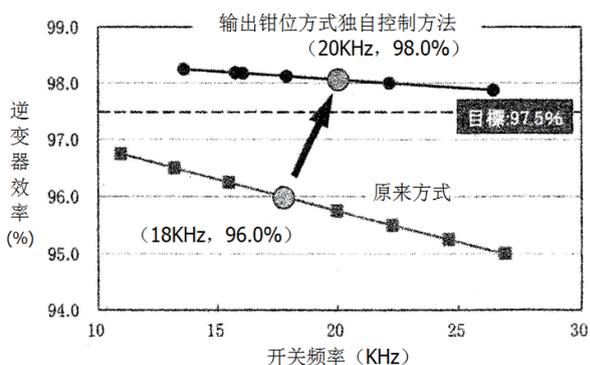


图10 原来方式与输出钳位方式独自控制方法中的开关频率与效率

4 输出钳位方式独自控制方法的效果验证

开发了试制的样机, 并对设定的品质项目进行了评价, 主要的评价结果列于表3。可全部满足了规定高效率、低噪音必要条件。

表3 样机评价结果

项目	目标值	独自方式
基本性能		
逆变器转换效率 (2KW)	97.5%以上	98.0%
运转时的音压 (10cm前面)	35.0dBA以下	28.8dBA
规定必需的条件		
漏泄电流	0.70mA以下	0.23mA
无功电流输出	电流相位差 $\pm 30^\circ$	电流相位差 $\pm 30^\circ$
电流畸变率 (综合)	4.5%以下	1.58%

5 结束语

为实现功率调节器的高效率、低噪音化, 输出电压振幅为1/2开关损耗可大幅度降低的输出钳位方式独自控制方法已进行开发。其结果, 逆变器中的损耗从75.6W减少到39.8W, 约削减49%, 转换效率达到98%。噪音比原来减小17.6dB, 运转时的音压28.8dBA (10cm前面) 均已实现。

本方法采用SiC和GaN高速器件, 则可进一步的高效率化。今后预计将本技术配置在功率调节器的系列产品上, 这将愈益广泛取得更大的节能降噪效果。

原文出处: 後藤周作, 岩松祐輔, 菊池彰洋, 藤井裕之, 高效率低騒音を実現する系統連系インバータ, (日)《电气评论》2017 NO.3 P49-52