

分布式电源并网开关元件损耗与散热问题的研究

目前分布式电源并网技术逐步成熟，研究重点已从控制并网电能质量转变为减少发电并网损耗，提高并网效率，降低成本。在分布式电源发电并网环节，并网控制器的开关元件损耗是影响并网效率的重要因素，针对此问题提出了系统的解决方法。首先在并网控制器的拓扑结构方面，针对传统节能损耗NPC拓扑结构进行深入的研究，提出了一种有更多续流状态的改进型NPC拓扑结构。同时针对此拓扑结构，设计了相应的控制策略，使并网控制器的开关元件有了更多的开关自由度，使系统散热控制可以达到准确的开关管控制，达到系统元件平衡散热，从而解决了逆变器的局部高温问题。系统通过并网实验验证，采用功率可调的PWM策略可以实现不同工作状态且不影响系统的输出电流，利用光热传感器对比发现，通过新的硬件拓扑和控制策略实现了系统开关元件的损耗平衡。

朱 赫 王 刚 戴宪滨 赵 毅 邹全平/沈阳工程学院电力学院



朱 赫/硕士研究生

关键词/Keywords

光伏并网系统 ·
拓扑结构 ·
损耗分布 ·
控制策略 ·

随着新能源产业的发展，分布式发电并网技术也随之成熟起来。目前，如何降低分布式发电并网的损耗，提高并网效率，降低发电成本成为了该领域的研究重点。分布式发电并网控制器的开关元件产生的损耗是影响并网效率的重要因素，应用NPC拓扑结构降低该损耗为近几年的主要研究之一。

NPC拓扑结构有良好的EMI特性，在电气领域首先应用于电力传动当中，用于消除电动机内的高频调制引起的漏电流，从而减少功率损耗。同时由于电动机控制系统与光伏控制系统在拓扑结构上，定转子间的漏电容跟太阳能板与地之间的电容结构相似，NPC拓扑近年来被引入光伏并网技术当中。传统NPC拓扑结构有三级输出电压，与单极性调值H全桥相似，可以提高逆变器效率，降

低一定的开关损耗低，EMI性能好，但传统的NPC拓扑直流输入电压相比于H全桥结构提高很多，而且开关元件损耗分布不平衡容易造成控制系统局部过热。

本文针对并网控制器拓扑效率实验中，传统NPC拓扑在不同的工况下，不同半导体元件上的元件损耗差异显著，这样不平衡的元件损耗分布会加大散热器设计的难度，针对以上问题本文提出改进型Active NPC拓扑结构及并网PWM策略。利用此种PWM策略可以使得Active NPC拓扑的元件损耗分布得以平衡，对正弦电流指令的无误差追踪，并得以实验验证。

改进型NPC拓扑结构

本文提出的新型的NPC拓扑结构如图1所示。在传统的NPC拓扑结构中，不同流向的续流电流往往只存在一条续流回路。而本文所提出的拓扑与传统的几种NPC结构对比，其控制过程中可以存在更多的零续流状态。如图1所示，逆变回路中存在两个可控开关元件，续流两

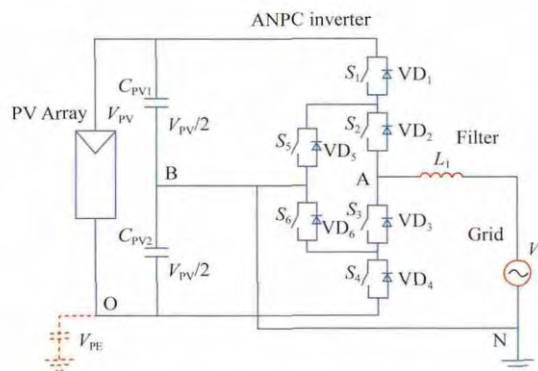


图1 NPC拓扑结构图

个方向的同路变为两条，因此为相应的控制策略提供了更大的自由控制空间来实现元件的损耗平衡。

本文所提出的新型拓扑输出电压波形有三级： $V_{pv}/2$ 、0和 $-V_{pv}/2$ ；与单极性调制H全桥拓扑类似。同双极性调制H全桥相比，可以减小电感的使用量，提高逆变器效率；开关损耗低，EMI性能好；相比传统NPC，加入了两个开关元件（一个桥臂），由于在变流器设计中，使用相同的元件有利用备件，同时加入一个开关元件桥臂对于变流器成本影响并不明显，但是相比传统NPC拓扑，理论上Active NPC可以控制元件损耗分布，因此Active NPC相比传统NPC更具优势；Active NPC更适用于功率等级较高的变流器拓扑。

PWM控制策略

针对本文所提出的拓扑结构，经过研究开发了相应的控制策略，在不同的工作状态下调节开关元件的损耗，实现损耗的平衡。

如图1所示，本控制策略可以具有六条续流通路，通过相应的PWM策略可以完成通过应用可控的续流通路，完成损耗平衡控制。表1为给定的开关元件表。

表1 给定的开关元件表

Voltage	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
Positive	1	1	0	0	0	1
0^{+In}	1	0	1	0	0	1
0^{+Out}	0	1	1	0	0	1
0^+	0	0	1	0	0	1
0^-	0	1	0	0	1	0
0^{-Out}	0	1	1	0	1	0
0^{-In}	0	1	0	1	1	0
Negative	0	0	1	1	1	0

其中具体PWM控制策略不需要所有的续流通路工作，正常工作时只需要选取四条工作通路完成控制，六条通路的通断选择周期变化如图2所示。当在正半周期图2a中 0^+ 、 0^{+In} 、正信号、 0^{+In} 和 0^+ ，负半周期图2c中 0^- 、 0^{-In} 、负信号、 0^{-In} 和 0^- 的系统换流状态下，开关元件的损耗在内管上。当系统的换流顺序在正半周期如图2b中 0^+ 、 0^{+Out} 、

正信号、 0^{+Out} 和 0^+ ，负半周期图2d中 0^- 、 0^{-Out} 、负信号、 0^{-Out} 和 0^- 时，开关损耗体现在外管上。

图2明确体现了系统的控制策略实现有源状态变为零续流状态换流的转换过程：当选择 0^{+In} 通路过渡到 0^+ 系统开关元件续流，此时内管 S_2 关断，同时内管上作用关断损耗；当通过控制策略选择 0^{+Out} 到 0^+ 控制系统续流时，外管 S_1 开始关断同时作用开关的关断损耗。通过这样的控制策略实现了本文所提出的新型NPC拓扑结构在不同的工作状态时，根据编程控制开关元件选择理想的零状态续流回路，实现开关损耗的平衡。

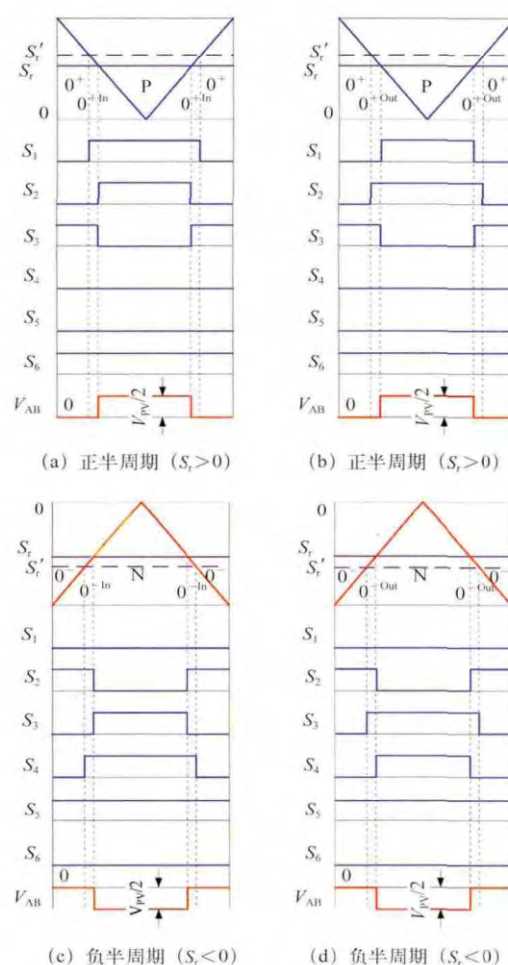


图2 PWM开关图

如图2所示的开关策略是给原有的调制波信号乘上一个放大系数 k 构成经过放大的调制波 S_r' ，即本文PWM控制策略的调制方法。在Stress In状态时， S_1 、 S_4 利用三角载波与放大的调制波 S_r' 比较产生PWM控制信号；在Stress Out状态时，调制波 S_r'

在 S_2 的正半周期工作，在 S_3 的负半周期工作；当系统的功率因数是1的时候， S_2 和 S_3 同时利用三角载波与放大调制波 S_4' 比较产生PWM控制信号。

针对传统的NPC结构的控制策略所产生的控制问题，本文所采用的控制方法都进行了有效的应对。首先对放大调制波后输出电流方向问题，本文经过研究与实验发现，输出电流取决于系统周期的有源状态和续流状态的时间，只要时间控制策略不变，系统不会因调制波放大问题出现输出电流反向。使用放大后的调制波 S_4' 进行调制是否会改变输出电流如图2所示，系统处于有源状态系统 S_1 、 S_2 导通时，系统没有同时增大内外开关管的调制波，因此系统不会因为放大调制波而出现输出电流反向。

在系统放大系数的选择问题上，本文经过研究得出的结论为放大系数不可以设置过小，会造成过渡零续流状态时间过短，系统不能完成换流；同时通过具体实验验证系统调制波幅值不宜超过载波幅值，系统在此情况下偶尔会出现错误脉冲，具体原因分析与采样周期相关，有待于进一步研究。

在Stress In和Stress Out状态工作时间设定时，系统控制策略原则首选考虑内管与外管间的元件损耗平衡，其次也考虑内外管分别存在两个开关管之间的损耗平衡。

在控制系统死区时间设置的问题上本文采用的控制策略为， S_5 和 S_4 断开的正半周期和 S_1 和 S_6 断开的负半周期时，在电网周期过零点时加入死区设置；在系统其他工作状态时，不设置死区时间，保证系统在过渡零序流状态下不受到死区时间的干扰。

如图3所示电网周期的PWM调制波形，在50%—50% Stress Out/Stress In的状态下，内外管在控制下承担了50%的损耗；在70%—30% Stress Out/Stress In状态下，实现了内管30%，外管70%的损耗承担。同时图3中的虚线部分即为系统在不同工作状态下所采用调制波情况。图4为系统在功率因数为1的条件下，系统的工作波形。系统的实验波形可以看出系统工作在不同的损耗控制策略

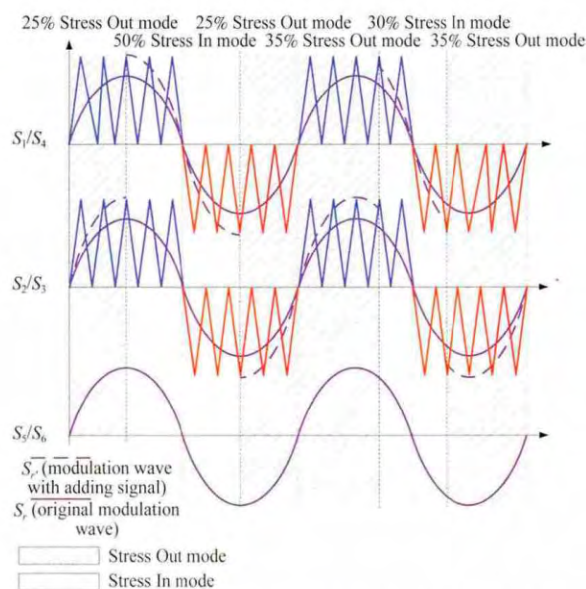
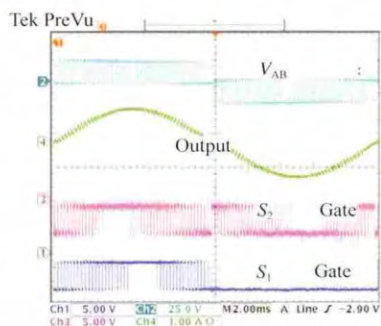
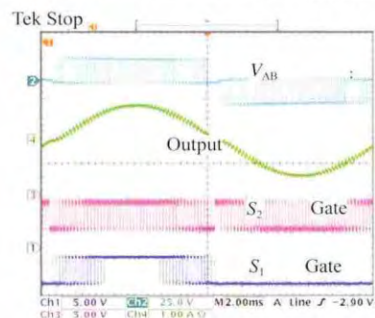


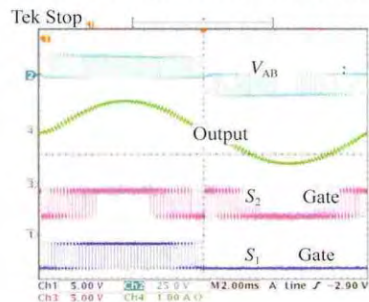
图3 ALD Active NPC PWM策略周期工作示意图



(a) 50%—50% Stress Out/Stress In模式实验波形



(b) 70%—30% Stress Out/Stress In模式实验波形



(c) 30%—70% Stress Out/Stress In模式实验波形

图4 NPC PWM不同模式实验波形

之下，输出的电流波形没有受到影响。

实验验证

本文利用eZDSP28335作为系统控制核心搭建了实验平台，如图3所示的实验为系统工作在有源状态下，内管和外管同时导通。实验结果表明在不同时刻增大内管和外管的调制波，不会改变输出电流，因此本文所提出的控制策略可以实现开关元件损耗的控制。

在功率损耗分布实验中，系统在没有加装散热片的基础上，设定系统的开关频率至18 kHz实验参数如表2所示。

表2 实验参数表

交流频率/Hz	50
开关频率/kHz	18
输出电感L/mH	6
直流电容 $C_{DC}/\mu\text{F}$	3 000
直流电压/V	450
R_{load}/Ω	15
实验功率/W	1 350
开关元件	PM75DSA120
功率因数	1.0
调制度	0.9

由热成像仪展示的系统实验结果，如图5a所示采用50%—50%调制比，内管温升迅速，承担了元件损耗；如图5b所示，在80%—20%调制模式下，系统所有的开关元件承担的损耗平衡，温度平稳。

结束语

针对传统NPC的拓扑结构，存在着不同的开关元件承受的工作损耗不同，损耗的分布会因为光伏发电工作状态改变，因而大功率逆变器的散热问题急需解决。本文提出了一种改进型的NPC拓扑结构，通过控制策略的编程控制，使逆变器的开关元件有了更多的开关自由度，从而解决了逆变器的散热问题。通过实验验证，采用功率可调的



(a) 50%—50% Stress Out/Stress In模式实验



(b) 80%—20% Stress Out/Stress In模式实验

图5 功率损耗分布实验

PWM策略，可以实现不同工作状态，通过调整开关损耗的分布来实现元件的损耗平衡。

参考文献

- [1] Bruckner T, Bernet S, Guldner H. The active NPC converter and its loss-balancing control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005, 52 (3): 855-868.
- [2] 许傲然, 张柳. 光蓄互补发电系统控制策略的研究[J]. 蓄电池, 2012, 49 (2): 35-38.
- [3] Daher S, Schmid J, Antunes FLM. Multilevel inverter topologies for stand-alone PV systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008, 55 (7): 2703-2712.
- [4] Thomas Bruckner, Steffen Bernet. The active NPC converter for medium-voltage applications [C]. Industry Applications Conference, 2005: 84-91.

(收稿日期: 2014-10-20) EA