

关于电动汽车蓄电池放电无功补偿的研究

殷晨晖, 张 磊

(江苏省电力公司检修分公司, 江苏 常州 213000)

摘 要: 随着节能减排越来越受到各国政府的重视, 电动汽车在这几年迅速发展。电动汽车蓄电池寿命的延长, 能够有效地降低重金属污染。为了延长蓄电池寿命, 需要将电量放尽后再进行充电。本文设计将电动汽车蓄电池放出的电能作为无功补偿并入电网。经过一系列的设计和电路选择, 在MATLAB仿真中采用了 i_p-i_q 的无功电流检测方法和滞环比较的控制方法, 对三相四线制三桥臂的D-STATCOM进行仿真。最后在本文结尾总结并分析了设计电路的补偿效果。

关键词: 节能减排; 电动汽车; 蓄电池; 无功补偿; 三相四线制

0 引言

随着化石能源的日益枯竭, 社会发展与能源短缺的矛盾也在日益加剧。国家为了缓解能源危机, 同时保护人类赖以生存的环境, 大力发展水电、风电以及地热能等可再生的清洁能源。电能作为主要的二次能源, 方便高效地传输了这些一次能源。为了充分利用这些清洁能源, 这些年国家通过政策导向, 鼓励发展电动汽车, 想要逐步替代燃油汽车。各国的专家也在电力电子、自动化和电机传动等领域投入了大量的研究。近日, “特斯拉”电动汽车的进口, 正是标志着这些年的研究成果。然而电动汽车在电能利用率方面还存在不少缺陷, 充电效率低, 续航能力差, 电池寿命短等问题依然没有得到有效解决。为了更加有效地利用电能, 我们可以从电动汽车蓄电池放电过程入手, 为节能减排提供一定的方案。

1 蓄电池放电无功补偿方案的设想

由于电动汽车使用的是电能驱动, 不产生污染, 因此前景被广泛看好。电动汽车的污染可以换算为发电厂产生的污染, 目前国内发电厂还是以火力发电为主, 相对来说污染还是偏大的。但随着脱硫、除尘技术的改进和水电、风电的大力发展, 相信污染会进一步降低。然而另一方面的污染来自于蓄电池产生的重金属污染。充电过程中的温度升高, 不仅浪费了电能, 还降低了蓄电池的寿命。电池回收再利用产业必须跟进发展, 同时蓄电池储能效率的提高还有待研究。

电动汽车的充电站在短时间内无法普及, 是电动汽车发展除了蓄电池之外最大的问题。由于快速充电方案需要电网提供强大的瞬时功率, 这就需要对电网进行升级, 增加了成本和时间。因此, 更换电池的方式是目前比较可行的方式。当电量偏低时, 到电站更换电池, 这样比加油的速度还要快。

出于延长电池寿命的考虑, 减少重金属污染, 更换下来的电池需要充分放电后才能再次充电。放电过程可以将电能回输给电网, 这并不是单纯的逆变回输给电网, 而是作为无功补偿输入电网。静止无功发生器作为交流柔性输电的关键设备之一, 已经被公认为具有良好的补偿性能, 正在慢慢成为今后无功补偿的趋势。这正可以和蓄电池的放电设备结合起来, 作为一种特殊的无功补偿。

2 无功补偿的设计

2.1 拓扑结构的选择

提到解决电网无功与谐波的问题以及三相负载不平衡的问题, 工程上首选的就是 D-STATCOM, 通过 D-STATCOM 的动态性、灵活性, 可以大大满足现有的系统所需要的实时性和很多较高的控制补偿要求, 当然, 具体实现中的补偿性能也取决于整个系统的性能, 而不单单指 D-STATCOM 的性能。

这里想要利用蓄电池放电来进行无功补偿, 需要进行一系列的改进。从 D-STATCOM 的本质上来说, 控制的本质就是对变流电路的控制, 也就是对开关模式的控制, 让电流变换电路的输出跟随着参考电压和电流的变化而变化。一般来讲, 根据直

流侧的电器元件的不同, D-STATCOM 可以分为两种, 即基于电压型逆变器和基于电流型逆变器, 具体结构见下图, 图 1 为基于电压型桥式电路, 即直流侧为一个电容。图 2 为基于电流型桥式电路, 即直流侧为一个电感。

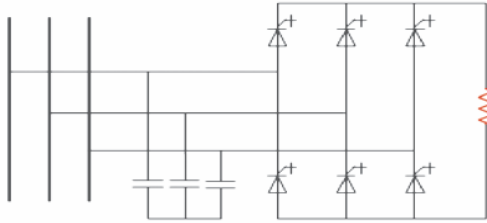


图 1 电压型桥式电路

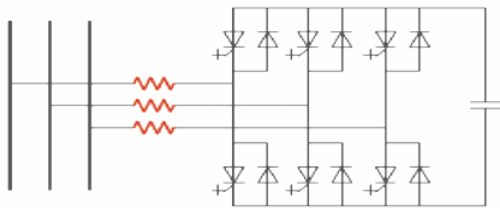


图 2 电流型桥式电路

这两种结构的主要区别就是连接电网处和直流侧使用的电气元件不同。对于电压型桥式电路, 直流侧采用电容元件, 也就相当于一个恒压源, 主电路通过将直流电压逆变成交流电压后通过连接处的电抗并入电网, 这种电抗起到了抵挡过电流, 滤除高次谐波的作用; 对于电流型的桥式电路, 直流侧采用的是电感元件, 相当于一个恒流源, 连接于电网处的电容为并联形式, 可以吸收换相时产生的过电压。本论文主要讨论的是基于电压型的桥式电路。

根据负荷接线的性质不同, D-STATCOM 又可以分为两种拓扑结构类型, 为三相三线制和三相四线制的主电路结构。我国的 380V 电力系统均为三相四线制的, 所以从负荷角度讲也是三相四线制接线的, 也就意味着存在着中性线, 这种零序电流里面就可能含有基波和谐波, 所以补偿的时候要进行考虑, 如果采用三相三线制也就无法补偿零序电流, 这也是这种结构的特点。因此本课题主要研究的是三相四线制的接线方式。

2.2 主电路结构选择的考虑

为了更好的发挥 D-STATCOM 系统装置的补偿性能, 既满足开关频率的要求, 还要满足容量的

要求, 基本上选取 IGBT 作为 D-STATCOM 的主电力电子器件。在配电网中, 主电路的结构选取基本是这样考虑的, 因为负荷方面基本是采取三相四线制的, 此时如果主电路采取三相三线制的也就意味着无法补偿中线的无功电流与谐波电流, 这样一来就会影响无功补偿的大体效果, 因此要采用三相四线制的并联型 D-STATCOM。在工程的具体应用上讲, 考虑到成本以及控制的难易和补偿的性能上讲, 一般采取电容中点式或者四桥臂的三相四线制 D-STATCOM。经过对各种拓扑结构的比较权衡, 以及对各种常见的控制方法的优缺点比较, 最终控制方法选取了直接电流控制中的滞环比较方式; 拓扑结构选取了三桥臂的电容中点式结构, 如图 3。

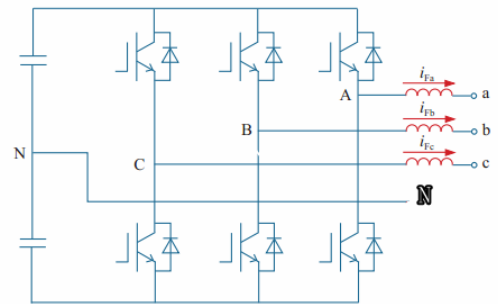


图 3 本次仿真选取的拓扑结构模型

3 无功补偿的仿真

3.1 D-STATCOM 仿真系统构造

本 D-STATCOM 系统由 MATLAB 软件中的 Simulink 模块进行仿真, 采用三相四线制的接线方法, 无功电流检测采用 $i_p - i_q$ 检测方法, 控制部分采用直接电流控制法, 使用滞环比较产生 PWM 触发脉冲波。负载采用两种方案的阻感性质稳定负载, 电源采用三相四线制标准正弦波交流电源, D-STATCOM 主电路采用基于 IGBT 的三桥臂桥式主电路, 直流侧采用双电容接线, 即电容中点型接线。仿真系统的全景图如图 4。

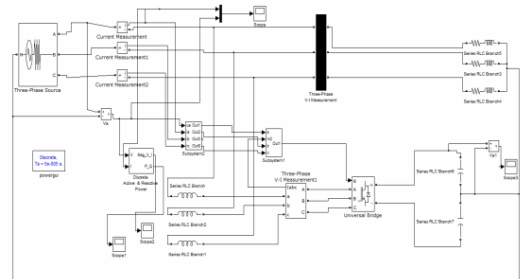


图 4 仿真系统全景图

仿真系统大体可以分为三部分组成，即无功电流检测部分，控制系统部分，D-STATCOM 发出无功电流及主电路部分。以下对上述三个部件一一展示描述。

1) 无功电流检测部分，具体构造见图 5。具体为 A 相电网电压同相位的正弦信号 $\sin\omega t$ 和相对应的余弦信号 $-\cos\omega t$ ，这两者由一个 PLL 锁相环和一个正余弦信号发生电路得到的。该算法通过计算出瞬时有功电流和瞬时无功电流分量，经过 LPF 滤波器滤波，得到 i_p , i_q 的直流分量，这里的分量可由 i_{af} , i_{bf} , i_{cf} ，变换得到。

本仿真该模块采用了 i_p — i_q 无功电流检测方法，通过采集一相的电压和三相的电流后通过相应的变换，得到电网中的无功电流成分，仿真图中，由于本系统没有仿真设置谐波成分，因此三号端口不用连接，采用悬空处理。

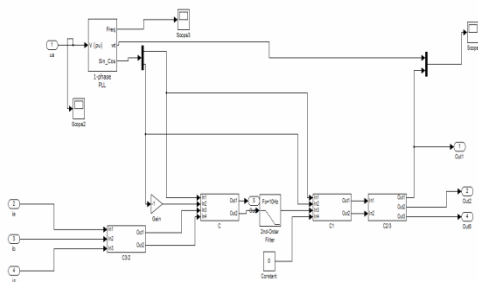


图 5 无功电流检测模块 i_p — i_q 仿真图

2) 控制系统部分，具体系统内部仿真构造见图 6。

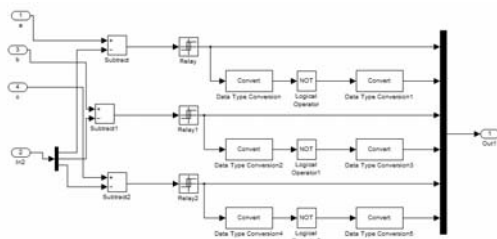


图 6 控制系统仿真滞环比较内部构造图

本系统仿真采用了直接电流控制中滞环比较的方式对系统进行控制，包括产生触发脉冲，控制 IGBT 正常工作，跟踪无功电流波形。滞环比较的主要原理就是用电流参考值的瞬时值与电流进行相减，差小于滞环的最大值的时候，就控制开关器件在电流增大的状态，反之差值如果小于滞环最小值的时候，控制开关器件在电流减小的状态，这样也就达到了跟踪参考电流的轨迹的作用。最后系统输

出的一号端口直接接入 IGBT 的触发脉冲接口。

3) D-STATCOM 发出无功电流及主电路部分，具体仿真构造图见图 7。

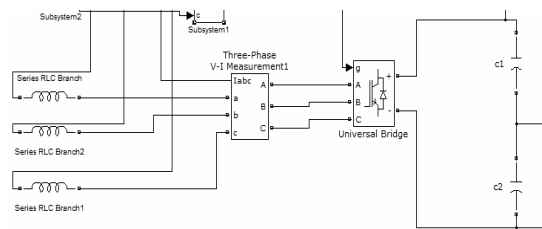


图 7 D-STATCOM 主电路部分仿真构造图

该部分展示了 D-STATCOM 系统的主电路部分及通过连接电抗并入电网。如图 7，仿真中 IGBT 的主电路采用了 MATLAB 中的 Universal Bridge 模块，内部通过设置简易的实现了三桥臂的内部结构，右边端口引出的正负线接双电容，两个电容的中点引出中性线，即和电容中点式的拓扑结构相一致。左边 IGBT 电路引出的三相 ABC 即发出无功电流，通过三个连接电抗的简单滤波作用并入电网。

3.2 系统参数的选择

在具体仿真系统实现时，要对各部分的参数进行考虑设计，这样才能达到最逼近现实的系统，这样得出的结论和结果才有具有研究意义，D-STATCOM 系统的参数确定主要为以下几个参数的确定，即负载的设计，连接电抗的大小选择，直流侧电容的大小选择，电源的电压和频率的选择和 IGBT 主电路的一些电参数设置。以下一对各部分的参数的确定过程进行真实的记录和分析。

首先是 IGBT 的主电路参数设置。本课题为三相四线制三桥臂的系统，即由 IGBT 控制三个桥臂，同时有二极管和 IGBT 相并联，最后引出正负极连接外侧的直流侧电容，参考了其他文献的一些参数考虑，加上自己对不同参数的试用仿真后，最后确定了仿真模块中桥式电路模块的各个参数。

其次是连接电抗的选择。电抗从理论上讲，值越小，整个系统的电流的跟踪能力也就越强，但是同时带来的坏处就是这样会将一些谐波也带入到电网，从而对电网造成不必要的污染，另外一方面，一旦 D-STATCOM 系统出现故障等问题，就会造成很大的过电流对系统造成影响，所以这个层面上讲电抗的选择又不能太小，要根据实际情况，系统的容量等进行选择。

再次是直流侧电容的选择。本课题采用的是三相四线制三桥臂的 D-STATCOM 系统, 也就会造成在直流侧要选择两个一样大小的电容串联, 并在中点处引出中性线连到电网当中去, 从控制效果讲, 要满足这个系统的实时的一种跟踪补偿, 就必须把直流侧的电压提的足够高, 一般的选择是直流侧电压要至少是系统与供电系统连接点的相电压的峰值的两倍以上, 理论上讲直流侧电压越高, 补偿的实时性也就越好。但是值得注意的是电容电压也不能过高。实际中要考虑 IGBT 一侧的各个器件的耐压情况, 所以这里也就制约了直流侧电压的设计, 越高越好但是也要综合器件的耐压水平。另外在实际的应用中, 直流侧的电压是会发生波动的, 这可能是由于系统吸收或者发出有功与无功的缘故, 也可能是由于器件的开关损耗等原因造成的, 所以电容实际上可要考虑一定的波动系数, 本课题由于在仿真中没有涉及非线性负载, 也几乎不存在谐波问题, 负载和电源部分均为对称, 所以基本上也就不会有太多波动问题。

综上所述, 本课题采用了以下的系统基本参数设定进行仿真研究, 参数见表 1。

表 1 系统基本参数设计

参数	数值
电源线电压/V	380
系统频率/Hz	50
连接电抗/mH	45
直流侧电容初始值/V	400
直流侧电容值/ μF	4000

负载设计采用两种不同方案。方案一为三相完全对称电阻电感串联负载设计, 方案二为三相不对称负载设计, 具体也为电阻电感串联的形式, 具体参数设定见表 2。

表 2 负载设计方案

方案	参数
方案一	电阻 $10\ \Omega$ 电感 0.01H A 相: 电阻 $10\ \Omega$ 电感 0.01H B 相: 电阻 $15\ \Omega$ 电感 0.05H C 相: 电阻 $20\ \Omega$ 电感 0.005H
方案二	

3.3 仿真结果及分析

1) 采用方案一时, 补偿前电源侧波形见图 8, 负载侧波形见图 9。

可见补偿前电源为负载提供所需的无功功率, 所以电源侧中电压电流形成一定的相位差, 产生无功功率, 负载中的电压电流波形与电源侧一致, 图

中幅值较高的为电压波形, 幅值较低的为电流波形。局部放大波形见图 10。

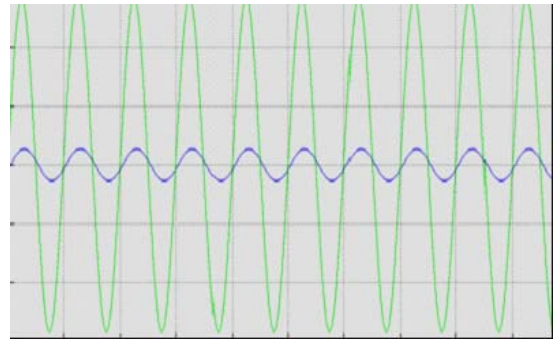


图 8 补偿前电源侧电压电流波形

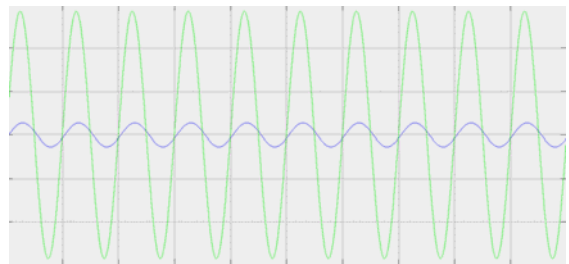


图 9 负载侧补偿前电压电流波形

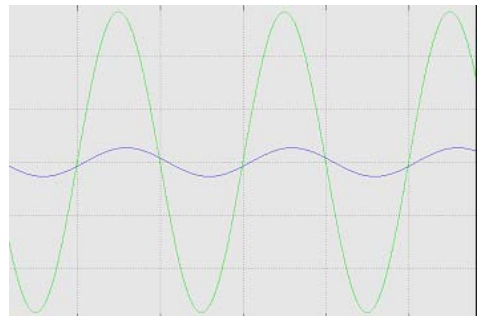


图 10 局部放大后的电压电流波形展示

当 D-STATCOM 系统投入使用后, 即补偿后, 电源侧电压电流波形见图 11, 局部放大波形见图 12。

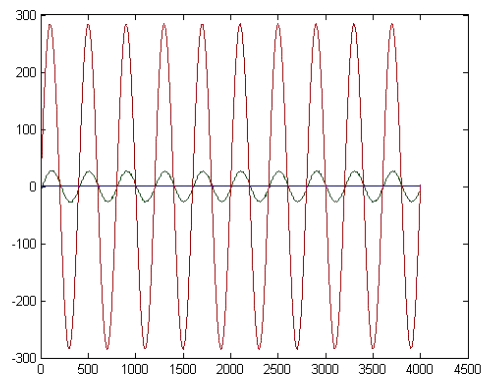


图 11 补偿后电源侧电压电流波形

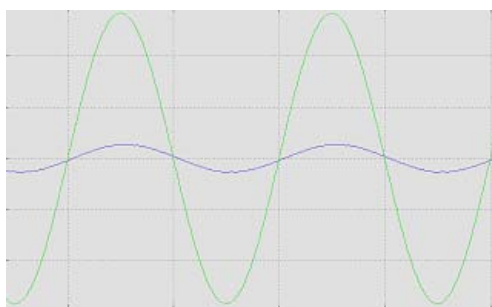


图 12 补偿后电源侧局部放大波形

由上图所示及简单的分析可知。幅值较大的波形为电源侧的电压波形，幅值较小的为电源侧的电流波形，从波形中看到电压和电流波形几乎同相位，两者存在很微小的相位差，也就是说该系统几乎成功达到了补偿的目的，即电网只在提供基波的有功电流和电压，负载所需的无功部分由 D-STATCOM 系统成功进行补偿了。

其中双电容的充电起始电压为 400V，仿真过程中双电容的充电上升过程见图 13。最终直流侧电容电压几乎稳定在一个定值，波形见图 14。



图 13 双电容充电电压波形



图 14 双电容充电后稳定波形

由图可知，两个电容几乎以同样的数值和幅度进行充电，最后电压稳定，由于负载采取的完全对称阻感负载，电源部分也采用完全对称的三相正弦电源，故两个电容的电压均衡上面没有明显出现问题。基本上直流侧电压平均的分配到了两个电容上。

D-STATCOM 发出的三相补偿电流的波形见图 15。图中为系统发出的三相补偿电流波形，通过连接电抗后并入电网，对电网中的无功进行相应的补偿。

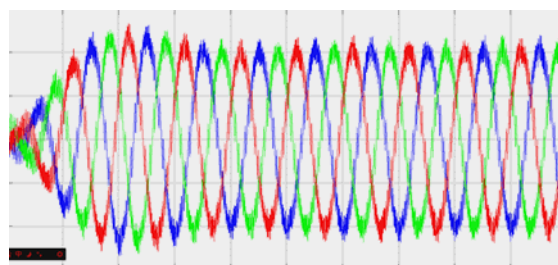


图 15 D-STATCOM 系统发出的补偿电流波形

2) 采用方案二时，补偿前的电源侧电压电流波形见图 16，负载侧的电压电流波形见图 17。有图可知，和方案一一致，未补偿前电源侧和负载侧的波形一致，电压电流存在着明显的相位差，即存在着无功功率的存在和传输，或者说电源在向负载提供者所需要的无功功率。其中幅值较大的为电压波形，另一个则为电流波形。

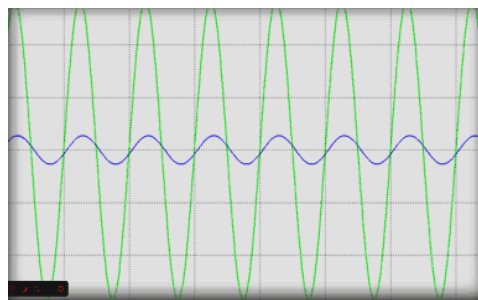


图 16 补偿前电源侧电流电压波形



图 17 补偿前负载侧电压电流波形

D-STATCOM 系统接入电网运行之后。即补偿后的电源侧的电压电流波形见图 18。局部放大波形见图 19。

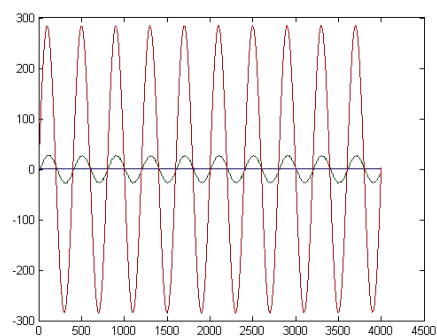


图 18 补偿后电源侧电压电流波形

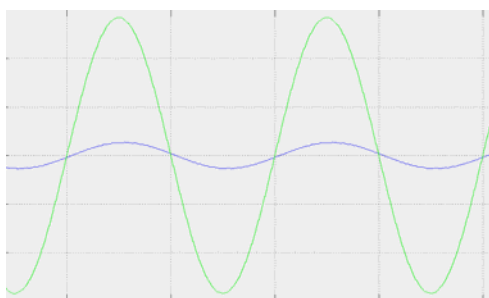


图 19 补偿后电源侧波形放大图

由上述图所示及简单的分析可知。幅值较大的波形为电源侧的电压波形，幅值较小的为电源侧的电流波形，从波形中看到电压和电流波形几乎同相位，两者存在很微小的相位差，也就是说该系统几乎成功达到了补偿的目的，即电网只在提供基波的有功电流和电压，负载所需的无功部分由 D-STATCOM 系统产生成功进行补偿了。

其中双电容充电波形见图 20。最终直流侧电容电压稳定，见图 21。



图 20 双电容充电电压波形

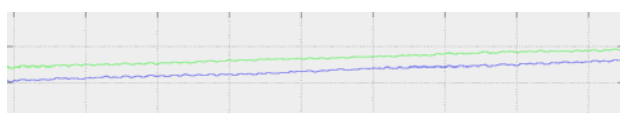


图 21 电容电压趋于稳定波形

由上面几个图可以看出，在三相负载不对称的情况下，电容充电电压和最后稳定电压都出现了一定程度的不平衡，即两个电容上的电压不是完全一样的。D-STATCOM 发出的三相补偿电流的波形见图 22。图中为系统发出的三相补偿电流波形，通过连接电抗后并入电网，对电网中的无功进行相应的补偿。

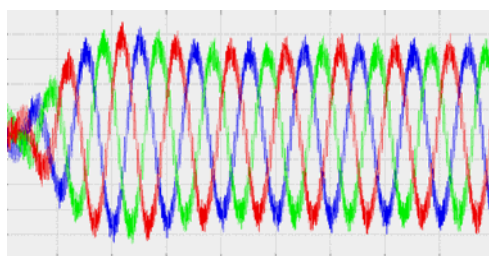


图 22 D-STATCOM 系统发出的补偿电流波形

由于负载的不对称，中性线中应该流过一定的电流，中性线的电流波形如图 23。

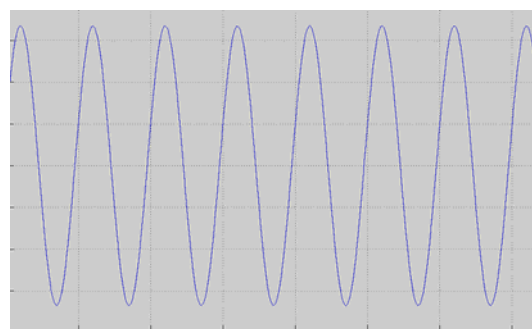


图 23 中性线电流

4 结论

本课题仿真采用 MATLAB 软件中的 Simulink 仿真模块，对三相四线制三桥臂 D-STATCOM 系统进行了基本的仿真，负载采用稳定的阻感负载加上三相不对称负载。从最后仿真波形可以看出，电源侧的电流电压的波形几乎为同相位，也就是说 D-STATCOM 系统基本实现了补偿无功的功能，使得电源侧只提供基波有功功率，优化了电网的电能质量。由于作者水平和时间有限，仿真存在很多改进和不足之处，现总结为以下几点：

1) 负载端的设计。本次仿真没有涉及到冲击性负载或者非线性负载比如整流桥负载等，而是采用了基本的阻感型负载，所以仿真中对于负载端的无功成分相对简单，具体应用中会有各种各样的负载，今后的学习研究中作者会给予更多的关注。

2) 电源的设计。本次仿真采用三相对称的标准正弦负载，没有设计谐波和畸变成分。而在实际应用中，电源的波形多少会发生一定的畸变，并且存在一定的谐波，即实际不存在绝对标准的正弦波，包括电源内阻的考虑还有传输线路的阻抗考虑，作者在今后的研究中会给予更多的关注。

3) 电容中点式的均压平衡控制考虑。三相四线制三桥臂的 D-STATCOM 系统直流侧采用了电容中分式的接线方式，在中点处引出所需的中性线，作者学习参考文献后加上自己的理论知识学习，得知在实际应用中该系统的技术难点就在于两个电容的电压平衡上的控制，因为实际应用中负载、电源乃至电路中的各个参数都不可能是完全对称和理想的，两个电容的电压一般会不一样，即双电容的均压平衡问题是个难点，在本次仿真中，由

于电源和负载的参数都不可能完全逼近现实系统,电容的电压问题没有真正凸显,表面看起来两个电容个的电压基本一样,不足之处为仿真中没有专门就电容的均压问题进行更深的探讨和仿真,作者在今后的研究学习中会给予更多的关注!

参考文献:

- [1] 董正华,常鲜戎,戴毅. D-STATCOM 主电路的研究和仿真分析[J].电气制造, 2012(11).
- [2] 苏仁斌. D—STATCOM 装置控制策略研究及驱动电路设计[D].北京: 华北电力大学, 2009.
- [3] 刘永敏. STATCOM 的动态无功补偿参数检测与数控技术的研究[D].镇江: 江苏大学, 2007.
- [4] 夏祖华,沈斐,胡爱军,等.动态无功补偿技术应用综述[J].电力设备,2004,5(10):27-31.
- [5] 王周杰. 基于 IGBT 的大容量 D-STATCOM 主电路研制[D].北京: 华北电力大学, 2009.
- [6] 叶明佳. 基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测方法研究[D].重庆: 重庆大学, 2012.
- [7] 翁海霞. 基于瞬时无功理论的 STATCOM 电流检测方法与控制技术研究[D].济南: 山东大学, 2011.
- [8] 董云龙. 静止同步补偿器(STATCOM)的仿真与实现[D].南京: 东南大学, 2004.
- [9] 王超. 静止无功补偿器 D-STATCOM 的研究[硕 D 文].西安: 西安理工大学, 2003.
- [10] 梁喆. 静止无功发生器无功电流检测和控制方法研究[D].淮南: 安徽理工大学, 2006.
- [11] 郭锐. 配电网 STATCOM 分析与控制研究[D].镇江: 江苏大学, 2006.
- [12] 焦广旭,段成群,郑牡丹.三相四桥臂 D-STATCOM 仿真研究[J].电气开关,2012(05).
- [13] 李涛,常鲜戎,唐坦坦.三相四线制 D-STATCOM 的工作原理与仿真[J].电气技术,2011(12).
- [14] 吴勇,万淑芸.谐波和无功电流检测的 Matlab 仿真研究[J].电测与仪表,2005(05).
- [15] 罗承廉,纪勇,刘遵义.静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [16] 汪宁,郭西进.MATLAB 与控制理论实验教程[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [17] 王兆安,黄俊.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [18] 常俊林,郭西进.自动控制原理[M].徐州:中国矿业大学出版社, 2010.
- [19] D.Sreenivasarao, Pramod Agarwal, Biswarup Das. Neutral current compensation in three-phase ,four-wire systems :A review. India: Electrical Engineering Department, Indian Institute of Technology Roorkee, 2011
- [20] M.S.El-Moursi, A.M.Sharaf. Novel reactive power controllers for the STATCOM and SSSC. Amsterdam: Electric Power Systems Research,2011.
- [21] H.F.Wang. Interactions and multivariable design of STATCOM AC and DC voltage control. Amsterdam: International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2002.

作者简介:

殷晨晖(1991),男,江苏常州,从事变电检修工作, E-mail: yinchenhui007@126.com;

张磊(1975),男,江苏常州人,高级技师,从事变电检修工作。