

电压不匹配运行条件下双有源桥变换器的效率优化方法

用户与研究成果简介：

合肥工业大学杨向真老师所在的科研团队针对双有源桥(DAB)变换器提出了一种零电压开通-电流应力优化(ZVS-CSO)控制策略，基于两自由度扩展移相(EPS)、双移相(DPS)调制，该优化控制算法实现了开关管的软开关及电流应力的优化，减小开关损耗与导通损耗，提升 DAB 变换器在输入输出电压不匹配运行条件下的整机效率。这种研究在上海远宽的 StarSim 实时仿真器以及实物平台上进行实验，通过实验结果验证了研究过程中理论分析的正确性和所提策略的有效性，并把成果总结发表于《电工技术学报》：

杨向真,王锦秀,孔令浩等.电压不匹配运行条件下双有源桥变换器的效率优化方法[J].电工技术学报,2022,37(24):6239-6251.DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.212065.

研究意义和现状

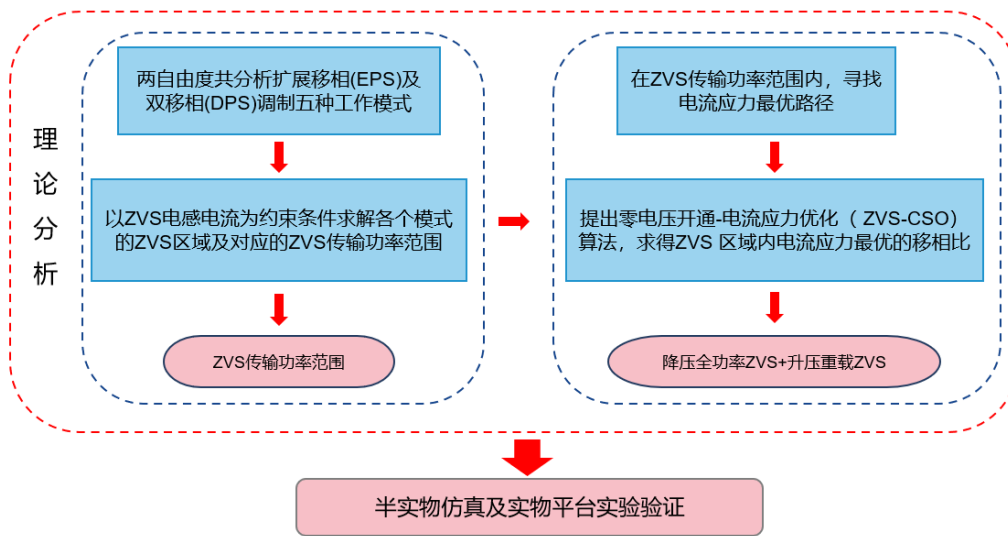
随着“碳中和，碳达峰”双碳战略目标的提出，以风、光、储、氢等多种可再生能源的多态能源微电网系统越来越被广泛使用。作为能量传递的核心部件，双有源桥（DAB）DC-DC 变换器因其具有功率密度高、电气隔离、易于实现功率的双向流动、宽输出电压范围、高增益等优点，用于微电网系统中以解决风、光、储、氢等多种能源输出电压波动范围宽的问题，但在轻载、大电压波动范围下系统转换效率低。针对 DAB 变换器，降低 DAB 变换器的功率损耗、对于提高变换器在宽电压运行范围下的整机效率具有极其重要的意义。

对于 DAB 变换器的控制而言,移相控制以能够充分利用开关管的软开关特性,减小开关损耗,提高系统效率而成为 DAB 变换器的主要控制方法。传统单移相（SPS）控制方式简单，但在输入输出电压不匹配时，变换器失去软开关且电流应力增大导致其运行效率较低，进一步地，扩展移相（EPS）、双移相（DPS）和三重移相（TPS）控制等高自由度的控制方式被提出对系统进行效率优化。基于高自由度控制方式的效率优化方法主要有两类：一类是以优化系统电流应力、减小系统导通损耗为主；另一类是以实现开关管的零电压开通（ZVS），降低开关损耗为主。

研究框架和具体步骤

杨向真老师团队针对 DAB 变换器软开关及电流应力优化问题，详细分析扩展移相及双移相调制五种工作模式的 ZVS 电感电流约束条件,并获得 ZVS 区域内的传输功率范围;为了进一步降低开关管的电流应力,在 ZVS 传输功率范围内寻找电流应力最优路径,求解得到 ZVS 区域内电流应力最小时的移相比,提出了零

电压开通-电流应力优化 (ZVS-CSO) 算法。最后，通过 StarSim 硬件在环半实物实验以及实物平台实验验证理论分析的正确性及所提策略的有效性。研究框架如下图所示：



理论分析与优化控制

合肥工业大学杨向真老师的科研团队首先分析了 DAB 变换器在两自由度移相控制方式下五种工作模式的传输功率范围，研究了升压和降压两种情况下软开关约束条件对传输功率的影响，以扩大变换器的软开关功率范围为目的选择合适的移相控制模式；基于选定的全功率范围软开关移相控制运行模式，提出了零电压开通-电流应力优化(ZVS-CSO)算法，求解出实现 ZVS 区域内电流应力最小时对应的移相比值。得到如下结论：

①两自由度移相控制五种模式下研究软开关约束条件对传输功率的影响。移相控制是 DAB 变换器的主要控制方式，将 DPS 和 EPS 五种不同的控制模式下的电压电流波形表示在图 1 中，其中 D2 为桥间移相比，D1 为桥内移相比。

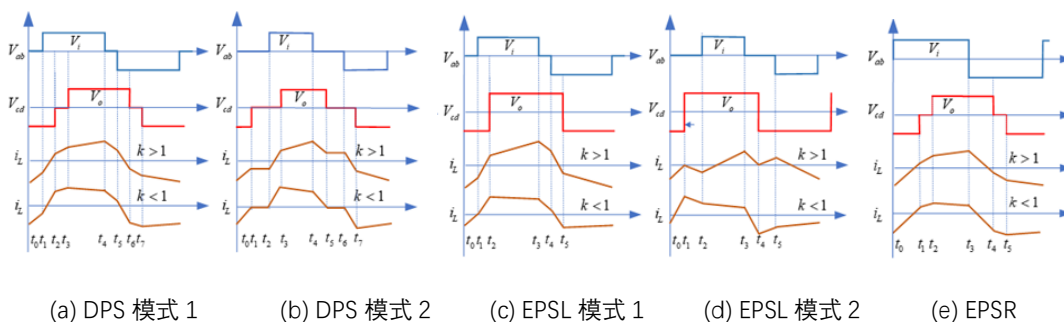
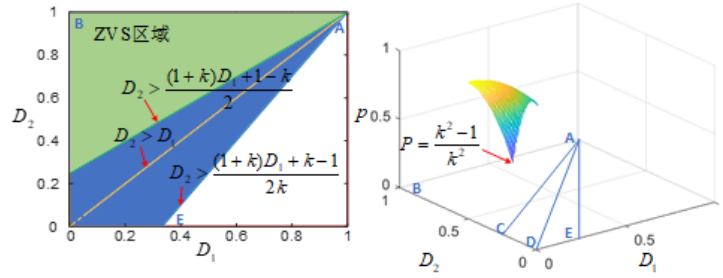


图 1 DAB 变换器在 DPS 和 EPS 不同控制模式下的电压电流波形

根据每个模式传输功率与 ZVS 约束条件，可求得 DAB 变换器的 ZVS 功率范围。图 2 为 DPS 控制模式 1 的 ZVS 范围与传输功率范围。同样的，可以得到上述五种模式下升压和降压两种运行条件下软开关区域

内的传输功率范围，具体如表 1 所示。



(a) ZVS 条件下的移相比区间 (b) 传输功率三维图

图 2 DPS 模式 1 下 ZVS 范围及传输功率三维图

表 1 DAB 变换器在各运行模式下的软开关功率范围

运行条件		传输功率 p 范围($k>1$)		传输功率 p 范围($k<1$)	
DPS	模式 1	$(k^2-1)/k^2 \sim 1$	重载	$1-k^2 \sim 1$	重载
	模式 2	0		0	
EPSL	模式 1	$2(k-1)/k^2 \sim 1$	重载	$1-k^2 \sim 1$	重载
	模式 2	$0 \sim 2(k-1)/k^2$	轻载	0	
EPSR		$(k^2-1)/k^2 \sim 1$	重载	$2(k-k^2) \sim 1$	重载
SPS		$(k^2-1)/k^2 \sim 1$	重载	$1-k^2 \sim 1$	重载

从表 1 中不同运行模式的软开关功率范围可以得到以下结论：

降压运行条件下，DAB 变换器在轻载时采用 EPSL 模式 2 作为控制方式，重载采用 EPSL 模式 1 作为控制方式，可以实现全功率范围的 ZVS。

升压运行条件下，采用 EPSR 作为主要的控制方式，可以实现重载情况下 $2(k-k^2) \sim 1$ 的全部开关管的 ZVS。

②对 DAB 变换器软开关区域内的电流应力优化，在减小开关损耗的同时减小导通损耗。为此，提出满足 ZVS 条件下电流应力优化策略的目标函数和约束条件为：

$$\begin{cases} \min I_{pi}(D) & (i=EPSL1, EPSL2, EPSR) \\ s.t & P_N(D) - p = 0 \\ & g_j(D) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, 8) \end{cases} \quad (1)$$

其中， $I_{pi}(D)$ 为模式 EPSL1、EPSL2、EPSR 的电流应力； $P_N(D)$ 为待优化模式的传输功率； $g_j(D)$ 为待优化模式的电感电流 ZVS 条件及移相比约束条件。

列写 KKT 方程并求解各个模式的最优移相比，最优移相比如下表 2 所示：

表 2 各运行模式的最优移相比及传输功率范围

模式	最优移项比组合 D_1 、 D_2	传输功率 P 范围($k>1$)
EPSL1	$\begin{cases} D_1 = (k-1)\sqrt{\frac{1-p}{k^2-2k+2}} \\ D_2 = \frac{1}{2} + \frac{k-2}{2}\sqrt{\frac{1-p}{k^2-2k+2}} \end{cases}$	$2(k-1)/k^2 \sim 1 (k>1)$
EPSL2	$\begin{cases} D_1 = \frac{2B+1-2A}{2-4A} - \sqrt{\frac{p/2-2B}{1-2A} + (\frac{2B+1-2A}{2-4A})^2} \\ D_2 = AD_1 + B \end{cases}$	$0 \sim 2(k-1)/k^2 (k>1)$
EPSLR	$\begin{cases} D_1 = (1-k)\sqrt{\frac{1-p}{2k^2-2k+1}} \\ D_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1-p}{2k^2-2k+1}} \end{cases}$	$2(k-k^2) \sim 1 (k<1)$

为了验证所提优化方案对电流应力的优化效果, 以传统 SPS 的电流应力为参考标准, 当电压传输比 k 大于 1 时, 绘制出图 3 (a) 中红线所示的电流应力优化路径与图 3 (b) 所示的电流应力比 $Q_i(k, p)$ 。可以看出电流应力比在全功率范围内都小于 1, 且在低功率段具有较好的优化效果。

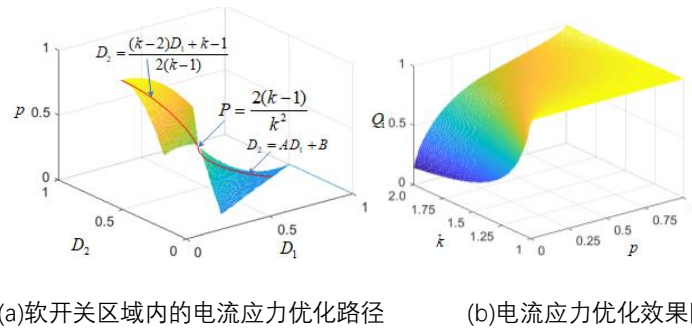


图 3 降压情况软开关区域内电流应力优化路径及电流应力优化效果图

当电压传输比 k 小于 1 时, 在功率 $2(k-k^2) \sim 1$ 范围内, 优化路径在功率曲线上的投影以及电流应力比 $Q_i(k, p)$ 如图 4 所示, 可以看出电流应力比在全功率范围内都小于 1, 因此所提 ZVS-CSO 优化方案实现了电流应力的优化。

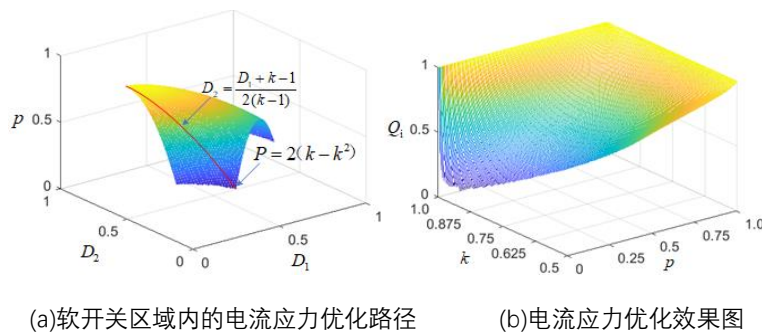


图 4 升压情况软开关区域内电流应力优化路径及电流应力优化效果图

研究发现, EPS 控制在扩展系统软开关功率范围, 实现全部开关管 ZVS 方面的性能要优于 DPS 控制。在降压方向采用 EPSL 控制实现了全部开关管 ZVS, 在升压方向采用 EPSR 扩展了 ZVS 范围, 本文所提 ZVS-CSO 策略在运行范围内能够实现全部开关管 ZVS 以及对电流应力优化, 有效地提升系统效率。

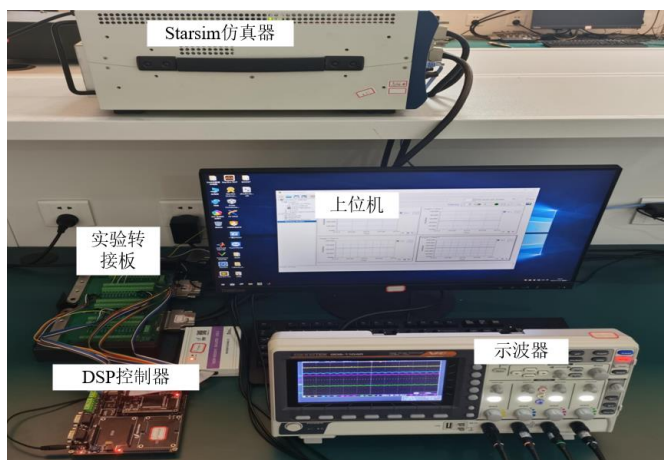
具体的理论分析与优化控制过程详见合肥工业大学杨向真老师团队发表的文章。

半实物与实物实验验证

由于 MATLAB/Simulink 离线仿真无法接入真实控制器，对于 DAB 变换器的仿真模型，无法体现出开关管损耗与结电容充放电过程。实时仿真器则可以同真实控制器连接，又不会有故障的问题，是对控制方法验证的理想测试设备。

远宽能源（www.modeling-tech.com）提供的 StarSim 实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真，被广泛应用于控制策略验证、牵引供电系统故障诊断、可再生能源并网、电机驱动等的实时仿真中；合肥工业大学杨向真老师的科研团队采用了 StarSim 实时仿真器来进行所提优化控制策略在升降压重载情况下全部开关管均能实现 ZVS 的实验验证。

半实物 HIL+DSP 测试平台示意图如下，其包括实时仿真系统 HIL 和 DSP 控制器，其中电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 100 微秒的步长实时仿真；在 Matlab 搭建所需电路，将主电路模型保存于 HIL 中，下载到实时仿真器，控制算法模型运行 DSP 控制器上，实时仿真器与 DSP 控制器通过接线箱闭环连接运行，示波器用于波形输出。



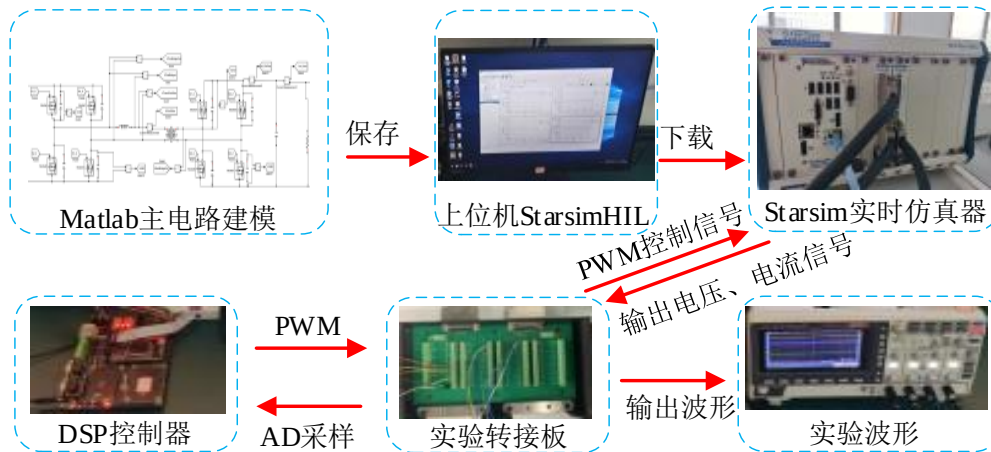
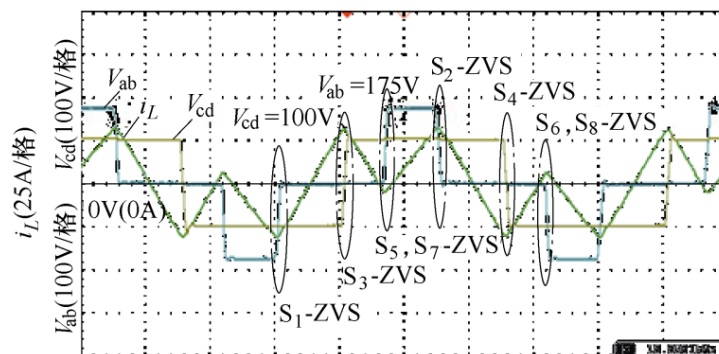
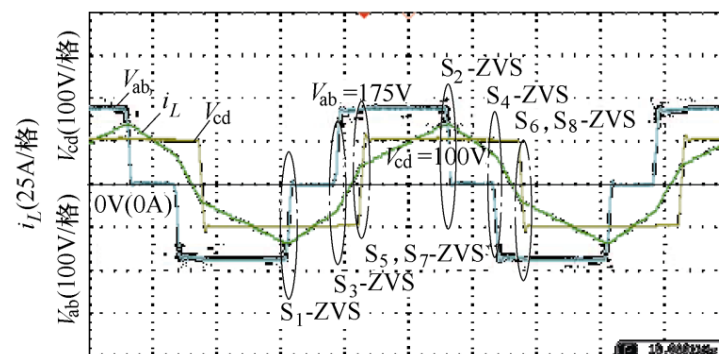


图 5 半实物 HIL+DSP 测试平台及工作流程图

搭建了额定功率 3.3kW、开关频率 10kHz 的 StarSim 硬件在环实验平台，调整输入电压，改变电压传输比。图 6 为电压传输比 $k = 1.75$ 时的电感电压、电流波形。可以看出，所有开关管均满足软开关要求。因此，当电压传输比 $k > 1$ 时，所提优化控制算法能够实现全功率范围内全部开关管的 ZVS。



(a) $P=400W$



(b) $P=3000W$

图 6 $k = 1.75$ 时电感电压、电流实验波形

图 7 所示为升压模式下电压传输比 $k = 0.75$ 时电感两端电压电流波形，此时系统传输功率 $P=950W$ ，从图 7 中可以看出，变换器所有开关管满足软开关电感电流要求。

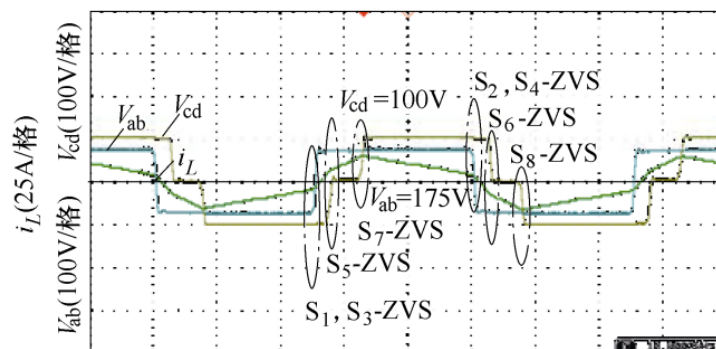


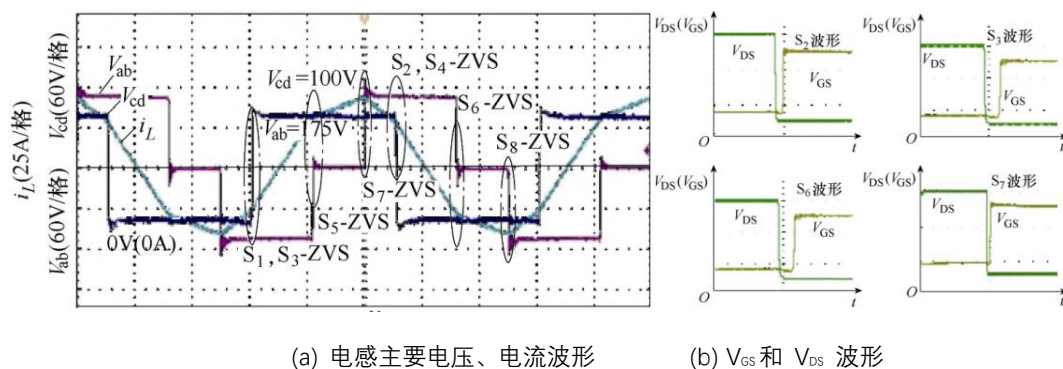
图 7 $k=0.75$ 时电感电压、电流实验波形

最后，为了验证所提 ZVS-CSO 优化策略在提升系统效率方面的有效性，在硬件实物实验平台上进行了验证，硬件实物实验平台如图 8 所示。系统开关频率 100kHz，额定功率 3.3kW，变压器变比 2:1，额定输出电压 100V。



图 8 实物实验平台

图 9 所示为 $k=0.75$ 、 $P=1\text{kW}$ 时 DAB 变换器的主要实验波形及开关管驱动波形 V_{GS} 和结电容电压 V_{DS} 波形。从图中可以看出，当驱动信号来临之前，电感电流就已经将开关管结电容电压反向充电到 0V，因此，开关管实现 ZVS，且由对称性可知上桥臂的 4 个管子同样实现了 ZVS。



(a) 电感主要电压、电流波形

(b) V_{GS} 和 V_{DS} 波形

图 9 $k=0.75$ 、 $P=1\text{kW}$ 时实验波形

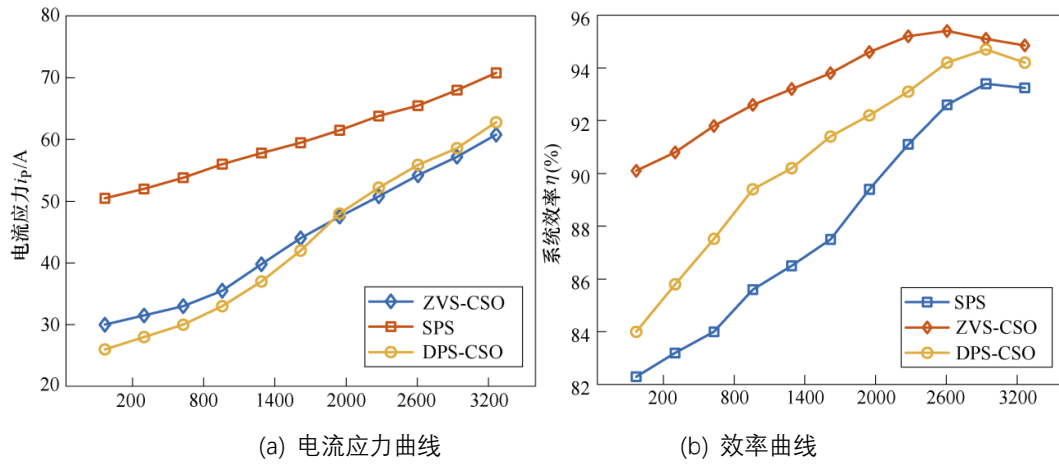


图 10 SPS、DPS-CSO、ZVS-CSO 控制下系统电流应力和效率随传输功率变化曲线

为了验证本文所提策略在提升系统效率方面的优越性,与传统 SPS 控制以及 DPS-CSO 策略进行对比。图 10 为电压传输比 $k=1.75$ 时分别采用 SPS、DPS-CSO 和 ZVS-CSO 三种策略下 DAB 变换器电流应力和系统效率随传输功率的变化曲线。由图 10(a)可知,在中低功率段 DPS-CSO 控制策略下系统的电流应力较小,而高功率段本文所提 ZVS-CSO 控制策略的电流应力最小,SPS 控制在全功率范围内电流应力都较高。

图 10(b)可以看出在低功率传输 $P=200W$ 时 SPS 控制下系统效率很低仅为 82.5%,而 ZVS-CSO 策略得到的系统效率为 91.2%;高功率运行时两种控制方式下的系统效率分别为 92.4%和 95.8%。因此,所提 ZVS-CSO 策略能够在降压模式下实现全功率范围软开关控制的同时有效减小系统电流应力,减小开关损耗和导通损耗,提升系统效率。半实物与实物实验验证了理论分析的正确性和所提策略的有效性。