

カオ アン トゥアン

氏 名 CAO ANH TUAN
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 博第1237号
学位授与の日付 2022年3月31日
学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目 SECONDARY-RESONANT SINGLE-ACTIVE-BRIDGE (SR-SAB) DC-DC
CONVERTER AND ITS CONTROL TECHNIQUES
(二次共振シングルアクティブブリッジ (SR-SAB) DC-DCコンバータ
とその制御技術)

論文審査委員 主査 教授 竹下 隆晴
教授 水野 幸男
教授 森田 良文
教授 野口 敏彦
(静岡大学)

論文内容の要旨

In the last two decades, the concerns about fossil fuel depletion and global climate change are promoting the growth of electric vehicle (EV) market. In 1997, the Toyota Prius was released in Japan and became the world's first mass-produced plug-in hybrid electric vehicle (PHEV). In 2008, Tesla released its electric vehicle, Roadster, which was the first all-electric vehicle (EV) car using Li-ion battery cell and with a range greater than 200 miles per charge. Nissan also released a Li-ion-battery-based affordable family car, the Nissan LEAF, in 2010, which became the world's all-time best selling highway-capable all-electric car.

The global electric car stock has been growing fast since 2015. It has now reached around total 3.2 million EV vehicles cumulative sale in 2020, with expectations of reaching between 30 million by 2030.

For increasing millage range of Electrical Vehicles, the power capacity of the battery must be increased over time, from 24 kWh (Nissan Leaf) to current 85 kWh (Tesla S) for millage range from 175 km to current 426km.

For supplying power for fast charging, high voltage power source from Medium voltage (MV) electrical power line will be reduced to 400V level by step-down transformer, and then supply to the input of the fast charger.

The fast charger will be fabricated from multiple inverter modules. For example, one 120kWh power fast charger of Tesla will be created by 12 modules of 10kW charging dc/dc converter module. The 10kW power charging dc/dc converter is normally used to charge 400 VDC level battery with the full-charge voltage around 480 VDC-500 VDC. The motivation in this thesis is to create the scale-down charging circuit to 48V level battery, but with the same current rating in the circuit with 480 VDC, 10 kW circuit, therefore the rated charging power is designed as 48 VDC, 1 kW charging capacity DC-DC converter.

Among various DC-DC configurations, Dual-Active-Bridge (DAB) or Single-Active-Bridge (SAB) are normally used for battery charging due to their simple control and easy parallel-modules working characteristic for high power charging. For unidirectional power charging, SAB will be used to save cost. However, the SAB DC-DC converter suffers from high peak current, voltage stress, small output voltage range/voltage conversion ratio (0-0.7), low total power factor (TPF) (TPF=0.66 in this thesis) leading to the inefficient design/utilization of transformer core and the circuit.

This thesis focuses on the development a novel, unidirectional, high-frequency isolated DC-DC converter called a Secondary-Resonant Single-Active-Bridge (SR-SAB) DC-DC converter. The circuit topology of the SR-SAB converter is a resonant capacitor connected to each diode in parallel in order to construct the series resonant circuit in the secondary circuit. As a result, the SR-SAB converter achieves a unity voltage conversion ratio, lower 23% primary input voltage which can be translated into 23% reduction in primary winding (copper wire) and primary steel core design, current peak reduces by 40%, higher TPF (TPF=0.89), wider power supply/or output voltage range (0-1.7) as compared to the conventional SAB. The SR-SAB therefore can be designed smaller and more compact. Small and nonsignificant overshoot values of current and voltage waveforms are observed. Soft-switching commutations of the primary H-bridge circuit and the soft recovery of secondary diode bridge are achieved.

The SR-SAB DC converter can be described as a hybrid converter between the Dual-Active-Bridge (DAB), Single-Active-Bridge (SAB) and the LLC resonant DC-DC converter, in which, most of the duty cycle the SR-SAB will work with the same philosophy as the DAB or SAB converter, and part of the duty cycle work as LLC resonant converter with the resonance between the leakage inductor and the resonant capacitor installed in parallel with the diodes.

The thesis starts first with the background, motivation, analysis of most common type DC-DC converters, analysis of traditional SAB DC-DC converter.

Then the operating philosophy of SR-SAB is analyzed, and the design at rated designed condition is presented. It is then followed by the operation of the SR-SAB for adjusting output power by variable frequency (VF) with soft-switching, or Pulse Width Modulation (PWM), step-changed output power control in the Constant Voltage (CV) mode.

After that, the combination of variable frequency (VF) and Pulse Width Modulation (PWM) executed to achieve soft-switching for Constant Current (CV) battery charging mode is presented.

The effectiveness of the SR-SAB converter was verified by experiments using a 1 kW, 265 VDC/48 VDC, and 20 kHz laboratory prototype.

Finally, for the purpose of reducing half of the switching devices, diodes, or to make the circuit more compact, and reduce cost, a half-bridge version of SR-SAB which is called Secondary-Resonant Single-Active-Half-Bridge (SR-SAHB), is presented with operating philosophy, parameter design, and output power regulation by variable frequency control. The SR-SAHB is then validated by experimental demonstration with a laboratory prototype 2.4 kW 265 VDC/265 VDC, 20kHz SR-SAHB isolated dc-dc converter.

論文審査結果の要旨

カーボンニュートラルに向けて、電気自動車の急速な普及が見込まれる。従来のガソリン車の給油時間に比較し、電気自動車の充電時間は、急速充電器であっても10倍以上の時間を要する。この充電時間の短縮のために、大電力DC-DCコンバータの開発が進められている。

大電力高周波絶縁型DC-DCコンバータとして、双方向のDAB(Dual Active Bridge)コンバータが用いられている。充電だけの用途であれば単方向で良く、簡単な回路構成を用いることができる。スイッチング素子をDABコンバータ半分の個数にした単方向高周波絶縁回路としてSAB(Single Active Bridge)コンバータが提案されている。SABコンバータは、スイッチング素子の電圧または電流の耐量および高周波変圧器の電力容量が、DABコンバータのそれぞれ2倍の大容量になる。

本研究では、単方向DC-DCコンバータとして、スイッチング素子数をDABコンバータの半分、スイッチング素子の電圧、電流の耐量と高周波変圧器の電力容量をSABコンバータの半分とするSR-SAB(Secondary-Resonant Single-Active-Bridge)コンバータを提案し、解析と設計を明らかにする。

第1章では、本研究の背景と目的、本論文の概要について説明する

第2章では、提案DC-DCコンバータの比較対象として4種類の代表的な高周波絶縁型DC-DCコンバータの特徴を示す。これらDC-DCコンバータに対して、提案方式のSR-SUBコンバータは、単方向コンバータで変圧器力率が高く、小型・高効率を実現できる点に大きな特徴がある。

第3章では、電圧変換比1の提案SR-SUBコンバータの動作解析および設計法を明らかにしている。さらに、出力電力制御法として高周波変圧器の周波数による制御法を提案している。1 kW, 265V / 48V変換、20kHzの試作コンバータによる実験結果にて理論検証をしている。

第4章では、SR-SABコンバータの出力電力制御法として、PWM(パルス幅変調)を用いる方法を提案し、その理論を展開している。1 kWの試作システムによる実験で理論通りの電力特性を確認している。さらに、出力電力の高速な過渡応答制御法を提案し、その実験検証も行っている。

第5章では、SR-SABコンバータの入出力直流電圧比1ではない場合において、変圧器の周波数とPWM制御とを組み合わせ、低損失を実現できるソフトスイッチングの適用範囲を広くする電力制御法を提案している。実験により電力制御理論の有効性を検証している。

第6章では、SR-SABコンバータの簡単な回路構成として、ハーフブリッジによる回路構成を提案し、動作解析と設計法を明らかにしている。2.4kW, 265V / 265V変換、20kHzの試作コンバータによる実験結果にて理論検証をしている。

第7章では、本論文で得られた成果、今後の課題、今後の展望について述べる。

CAO ANH TUAN 氏の博士論文で論じられている上記研究の成果は、学術論文3編(全て審査有り)および国際会議論文3編(審査有り)に公表されている。これらの学術的な価値から、博士論文として十分な内容と判断され、博士(工学)の学位に適格であると認める。