

# 利用谐振提高CW电路中的升压比与变换效率

邓隐北，黄仁珠，周志明，吴湘 编译

江西森阳科技股份有限公司

## 1 前言

对电动汽车及燃料电池应用系统等，因要求高电压，故必须具有高升压比的电力变换器，在此背景下，目前正在重新评价对高升压比电力变换器的研究开发。其中，CW 电路因电路结构简单，且勿需有源开关这些优点，即使从过去以来，作为高升压比变换器的 CW (Cockcroft-Walton) 电路，就一直在广泛应用着。但是，由于负荷电流导致升压比的降低以及电源频率的制约，仅在 X 线照射装置、粒子加速器、绝缘试验装置等小型电力设备上使用。而且，在基于 CW 电路、采用二极管的整流器中，因从电源以后出现的功率因数低劣，多数均需改善功率因数的电路。

为提高升压比，对电源频率的高频化和段数的增加，电路结构上的改进，以及参数的调整等均提出了方案。迄今，因受到半导体元件的限制，电源频率尚处于 1KHz 以下，但由于现在半导体技术的进步，利用可高速操作的半导体元件，使用频率已超过 1KHz，尤其以 SiC 为首的宽禁带半导体元件的普及，目前可以使用到 100KHz 以上的高频率。

此外，在以前可以说，升压比降低的主要原因是负荷电流。但即使在没有流过负荷电流的空载工况下也有升压比降低的情况，其主要原因是由二极管的接合电容所致，这点已得到理论上的证明。特别是近年来引人注目的 SiC 二极管，接合电容比原来的 Si 二极管的更大，故担心 CW 电路中的升压比会降低。

本文对提高 CW 电路中的升压比及改善变换效率为目的的电路，提出了方案并进行验证。改善的电路是在 CW 电路的输入端插入了电感器 (inductor)，利用电感器与二极管的接合电容产生的谐振。在 CW 电路上配置了 SiC SBD (肖特基势垒二级管)，即使在高频操作时也能适应。

而且，特意利用了导致升压比降低的二极管接合电容，来达到升压比提高的目的。另外，插入的电感器可改善功率因数，当然也能提高变换效率，这已有报导。

## 2 原来的 CW 电路与本文提出的电路方案

本节给出了原来 CW 电路中的电路操作，首先，显示了原来 CW 电路的结构，其次说明了存在的主要问题。然后，对原来电路的负荷特性进行了评价，说明升压比降低的原因。最后，给出本文提出的电路方案，并对其有关效果予以介绍。

### 2.1 作为对象的电路及其设定

在本节，对作为对象的原来 CW 电路及其设定有关情况进行了说明。图 1 所示为 5 段的 CW 电路。电容器与二极管交互的连接着，由于输入电压极性的反转，切换着二极管的导通与非导通。理想情况下，对于电容器  $C_1$ ，是以与输入  $C_1$  的电源电压幅值相等的电压进行充电的；这以下的电容器  $C_2$ ，则是以 2 倍相同幅值的电压进行充电的；因此，图 1 所示的 5 段 CW 电路，理论上就可得到 10 倍输入电源电压的输出电压。但是，我们知道，负荷电流与二极管的接合电容会使升压比降低，而且，以 CW 电路为首的使用二极管的整流器中，输入电流的高次谐波和低的

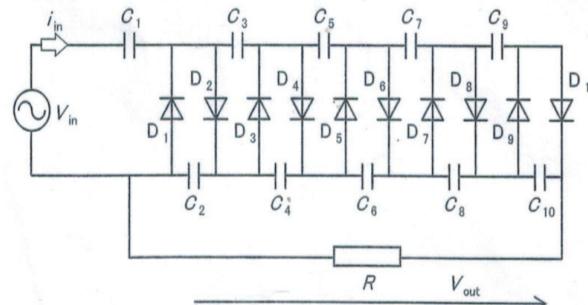


图 1 5 段 CW 电路的电路图

功率因数，加上由此导致的变换效率降低会存在这样的问题。尤其在 CW 电路的场合下，二极管出现逆偏置电压时，二极管接合电容的影响将更为显著。为此，必须采取对策，使用改善功率因数的电路等，以便提高功率因数与变换效率。

下面，调整好图 1 中的参数。令输入电源的电压幅值  $V_{in}=100V$ ；频率为 100KHz；实验中，这一输入电源采用高速双极性 (bipolar) 电源 (HSA4051)。此外，电容器  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 10$ ) 的容量全部相等； $C=4700\mu F$  (耐压 3KV, 为陶瓷电容器)。这里，因使用了高耐压的电容器，故设定为小容量。二极管采用高频特性良好的 SiC SBD (SCS105KGC, 1200V, 5A)。最后，负荷采用了纯电阻  $R$ 。这一阻抗器为电力用金属薄膜电阻器 PRO3 (1MΩ, 3W)。

继而，对本文有关的评价指标予以说明。首先，介绍对于输入、输出电压的升压比  $\alpha$  的概念。由图 1 电路的输出经过整流，变换或直流，故将其平均值作为输出电压值  $V_{out}$ ，并将  $\alpha=V_{out}/V_{in}$  定义为升压比。随后再介绍有关功率因数和变换效率。本文中作为功率因数，采用了总功率因数 TPF (Total Power Factor, 以下简称 TPF)。另计，变换效率  $\eta$  为输入、输出功率之比。

## 2.2 原来 CW 电路中的负荷特性

本节，将对原来 CW 电路中升压比的负荷特性进行评价。

首先，说明有关实验条件。为结合下述第 3 节的设定，负荷阻抗值增加 250KΩ、500KΩ、1MΩ 三种场合，限定于其以下的负荷阻抗值。并在图 1 的正常状态下，测定升压比  $\alpha$ 。

下面，将上述负荷特性的结果示于图 2。即使在几乎

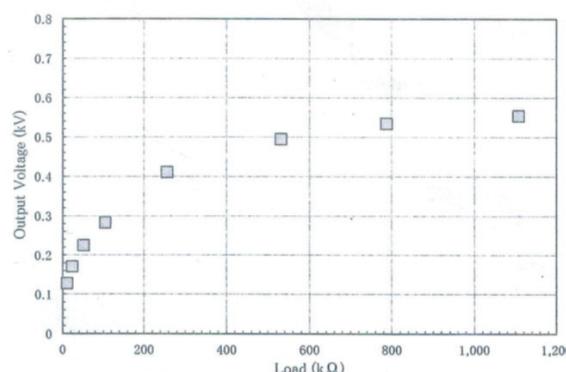


图 2 原来 CW 电路中升压比的负荷特性

无负荷状态的  $1M\Omega$  下，也可见到升压比  $\alpha$  的降低。原因是上述二极管的接合电容所致。负荷阻抗值进一步减小，由于负荷电流导致升压比  $\alpha$  有降低的倾向。

## 2.3 本文所提方案的电路

在本节给出了所提方案的电路。为解决上述原来 CW 电路的问题，所采取的有关对策介绍如下。尤其，对该提案电路中升压比  $\alpha$  降低原因的二极管接合电容，特意予以利用这一点也进行了详细说明。

所提方案的电路如图 3 所示，是在原来 CW 电路的输入端，插入了一个电感线圈。由于电感线圈的插入，则可调整输入侧的功率因数。而且，因延长了二极管电流的导通时间，就可将输入的电流有效的输送至负荷。最后，功率因数 TPF 和变换效率  $\eta$ 、升压比  $\alpha$  也许均得以改善。

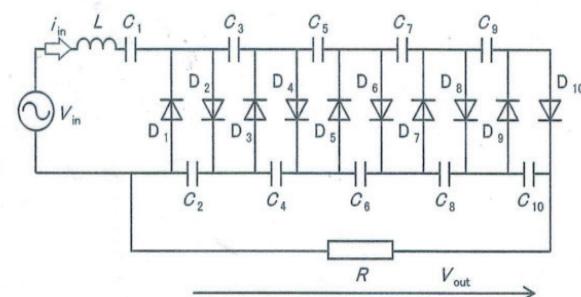


图 3 插入电感器提案的 5 段 CW 电路

此外，对升压比降低原因的二极管接合电容，提出了利用充效电的方案。通过电感器的插入，相当于从输入侧连接着 LC 滤波器，利用这一 LC 滤波器上产生的串联谐振，则可以提高升压比  $\alpha$ 。

将二极管接合电容与插入电感器的谐振频率设计成接近输入电源的频率，对输出电压的峰值进行观测。

## 3 验证实验结果

本节是对 2.3 所述提案电路进行实际验证的有关实验结果。插入电感器电感变化时的升压比  $\alpha$ 、功率因素 TPF、变换效率  $\eta$  的实验结果，如图 4 (a) ~ (c) 所示。

图 4(a)的结果中，无论在哪一种电阻时对于峰值而言，比较原来 ( $L=0mH$ ) 的结果可知，升压比  $\alpha$  均在不断上升。特别是，由于插入的电感值而出现了升压比  $\alpha$  的峰值。认为这是因调整电感值使得 LC 谐振频率接近于电源频率之故。上述的二极管结合电容之值标示为 CT，现对谐振

频率进行考虑。CW 电路中，二极管断开的时间长，则全部二极管 D1~D10，其接合电容 CT 认为是等值的。此时，将接合电容 CT 与电路内的 C 进行比较时，接合电容 CT 小，故从电源开始见到的全部阻抗可近似为  $10CT$ ，而且由于插入的电感与接合电容 CT，全部阻抗值相当于  $10CT$ ，采用各自峰值时的 L 值计算 LC 谐振的谐振频率。

$$fr = 1 / [2\pi(L \cdot 10G)]^{1/2}$$

按照  $L=6.0\text{mH}$ ,  $CT=40\text{PF}$  (接合电容参照数据表) 进行概算  $fr=102.7\text{KHz}$ ，这认为与电源频率的  $100\text{KHz}$  几乎是等值的。因此可以说，图 4 (a) 的升压比  $\alpha$  的峰值，是由于 LC 谐振的影响所致。然后，因负载阻抗值的降低是向 L 值减小的方向偏移，这也是与 LC 谐振的特点一致的。而且，超越 LC 谐振的电感值以后，升压比  $\alpha$  急剧的下降。这认为是因谐振频率  $fr$  低于电源频率  $100\text{KHz}$ ，LC 滤波器起到低通滤波器 (Low-pass filter) 作用的原故。此外， $L=1\text{mH}$  附近的小峰值，可认为是组成电路的 10 个电容器 C1~C10 与插入电容器 L 的谐振。

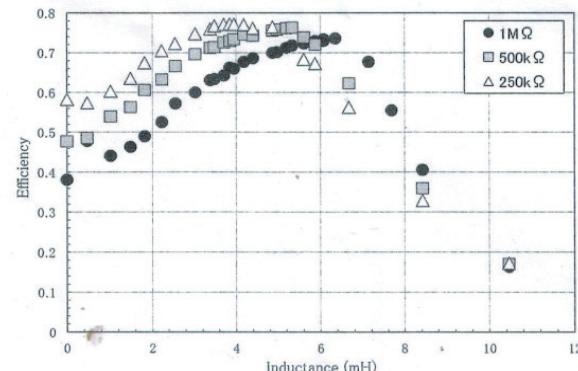
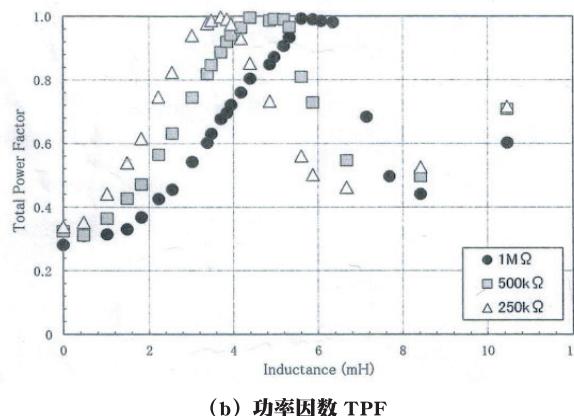
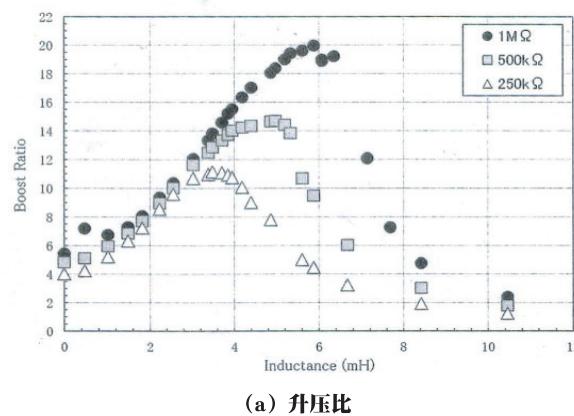


图 4 提案 CW 电路中的电感器特性

最后，图 4 (b)、(c) 的结果令人注目。在图 4 (b)，当与图 4 (a) 峰值相同电感值时，得到了几乎  $100\%$  功率因数的结果。这考虑是上述 LC 谐振时输入的电压、电流处于同相位，功率因数 TPF 得以改善。在图 4 (c)，还可见到变换效率  $\eta$  也得到了提高。

#### 4 结束语

本文，重点阐述了广泛应用的高升压比电力变换器，并对其性能（升压比、功率因数、变换效率）改善为目标的研究结果进行了介绍。在原来的 CW 电路插入电感器的新提出方案电路中，已确认升压比提高、功率因数与变换效率改善这一结果。而且，在升压比的峰值时已显示出功率因数及变换效率的最大值。

今后，有效利用 SiC SBD 的高频特性，设定电源频率在  $100\text{KHz}$  以上的场合下，进行了验证。然后，根据其频率特性的结果，预定将促进包括输入电源在内的变换器的广泛应用。此外，本文中进行的是输出容量为数瓦 (w) 级的验证，目前，已设定的大容量化实用电路也正进行研讨。以后在不断引入高升压比电力变换器的过程中，本文的研究成果将有助于电力电子技术的进一步发展。

原文出处：南政孝，共振を利用した Cockcroft-Walton 回路における昇圧比および変換効率の向上，《電気評論》2017.12,P62-65