

リアクトル電流不連続モード制御高力率コンバータの研究開発動向

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2012/7/30 舞鶴高専 平地克也

概要

前回と前々回の平地研究室技術メモ(1)(2)では単相入力の高力率コンバータのリアクトル電流不連続モード制御方式を紹介しました。今回はまず3相入力の不連続モード制御方式を紹介し、次に不連続モード制御の最大の欠点である大きなピーク電流の影響を検討します。最後に不連続モードの研究開発動向を説明します。

3相入力リアクトル電流不連続モード制御高力率コンバータ

平地研究室技術メモ No.20120531(2)で単相入力の昇圧チョップパ型リアクトル電流不連続モード制御高力率コンバータを紹介しましたが、同じ原理で3相入力の高力率コンバータも実現することができます。図1に回路図を示します。Q1がONすると全波整流ダイオードD1を介して3相が全て短絡されることになるのでQ1がONの時の等価回路は図2のようになります。図2から明かなように各相のリアクトルLR、LS、LTにはそれぞれR、S、Tの相電圧が印加されます。したがって、Q1のON時間を一定とすれば各リアクトルのピーク電流は各相の相電圧に比例します。図3にシミュレーション結果を示します(3)。各相のリアクトル電流のピーク値が正弦波状に変化していることが分

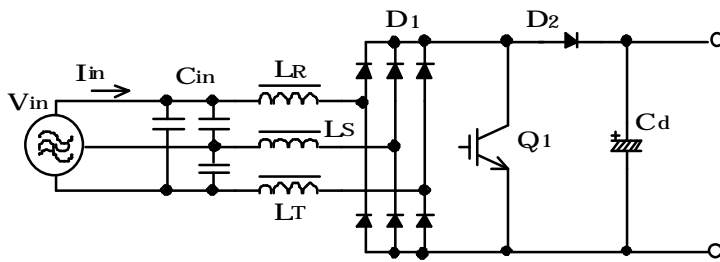


図1 3相入力電流不連続モード制御高力率コンバータ

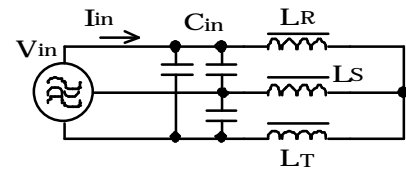


図2 Q1がON時の等価回路

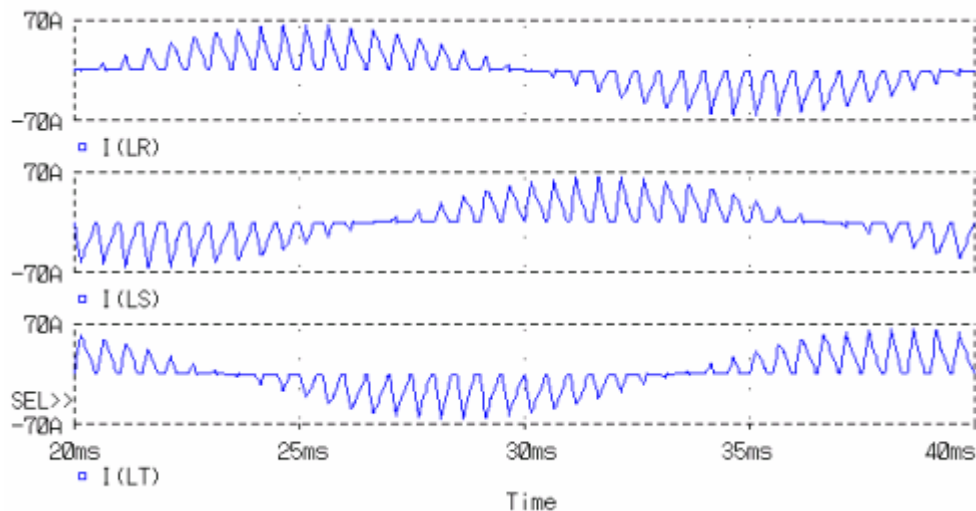


図3 各相のリアクトルLR、LS、LTの電流波形

かります。なお、図1の回路は普通は数10kHzで動作させますが、シミュレーションでは波形の形状を明確に確認できるように2kHzで動作させています。

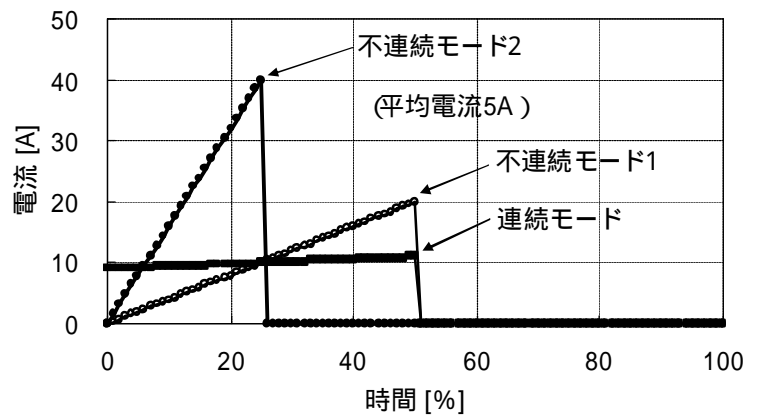
図3の波形からCinで高周波成分が除去されて入力電流Iinとなります。Iinはおおむね正弦波の波形となりますが、単相入力の昇圧チョッパ型リアクトル電流不連続モード制御高力率コンバータと同様に完全な正弦波にはなりません。3相入力では単に高調波のガイドラインを満足するだけでなく、さらに高いレベルの高調波抑制が要求されることが多いので図1の回路よりもさらに高調波を抑制できる回路方式が研究されています(例えば(3)(4)(5))。また、リアクトル電流のピーク値を抑制するための回路方式も検討されています(例えば(6)(7))。

スイッチ素子の順方向電力損失の比較

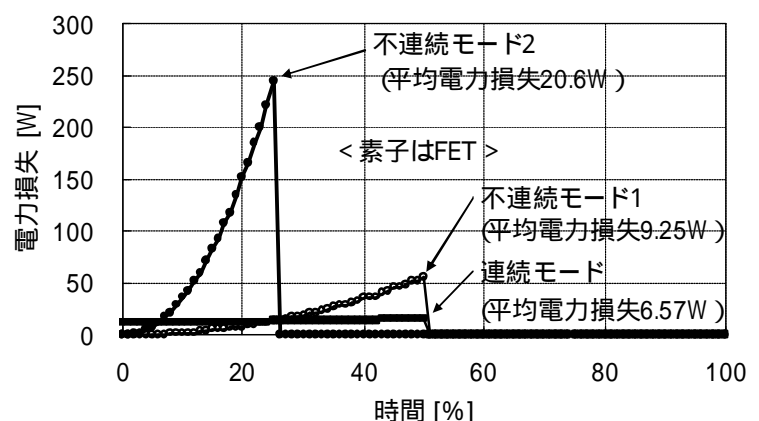
リアクトル電流不連続モードではリアクトル電流のピーク値が大きくなり、その結果スイッチ素子などの電力損失が増加することが最大の欠点です。そこで、電流のピーク値が大きくなるとスイッチ素子の電力損失がどの程度増加するか検討します。

図4(a)に比較用いる電流波形を示します。スイッチ素子の1周期分の電流波形を示しています。時間軸は1周期を100%として表示しています。連続モードの波形は通流率50%で9Aから11Aに変化する波形を考えます。不連続モードでは2種類の波形を考えます。不連続モード1は通流率50%でピーク値20A、不連続モード2は通流率25%でピーク値40Aです。境界モードではおおむね不連続モード1のような波形になるでしょう。通常の不連続モードではおおむね不連続モード2のような波形になるでしょう。3つの波形はいずれも平均値は5Aです。

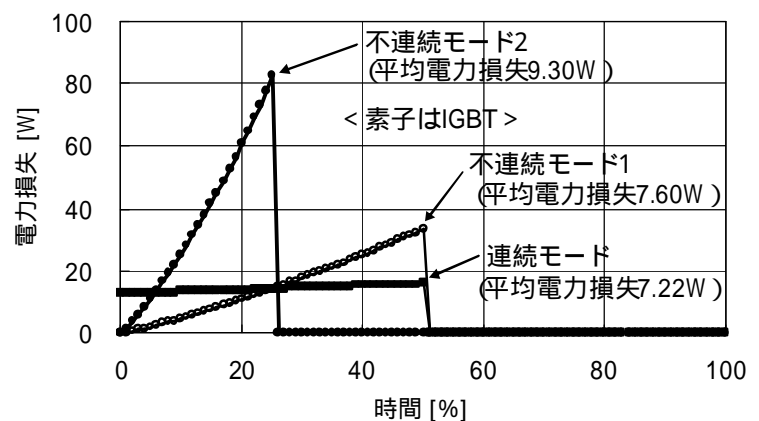
図4(b)はスイッチ素子にFETを用いた場合の1周期の導通損失の変化を示します。不連続モード2では電流のピーク値付近の損失が著しく大きくなります。1周期の平均電力損失は20.6Wであり、これは連続モードの平



(a) 比較に用いた電流波形



(b) 電力損失の変化 (FETにて)



(c) 電力損失の変化 (GBTにて)

図4 スイッチ素子の電力損失比較

均電力損失 6.57W の 3.14 倍になります。不連続モード 1 では平均電力損失は 9.25W で連続モードの 1.41 倍です。

図 4 (c)にはスイッチ素子に IGBT を用いた場合の 1 周期の導通損失の変化を示します。不連続モード 2 では電流のピーク値付近の損失が FET の場合よりかなり抑制されています。平均電力損失は 9.30W であり、これは連続モードの平均電力損失 7.22W の 1.29 倍になります。不連続モード 1 では平均電力損失は 7.60W で連続モードの 1.05 倍です。

計算に用いたスイッチ素子の V-I 特性を図 5 に示します。FET、IGBT いずれも日立製の定格電流 50A のものです。FET は電圧降下が電流に比例して増大するので電流のピーク値が大きいと図 4 (b)のように電力損失が著しく増加します。IGBT は電流が小さい領域では FET より電圧降下が大ですが、電流が増加しても電圧降下はあまり増大しないので図 4 (c)のように不連続モードでの電力損失の増加はかなり抑制されます。

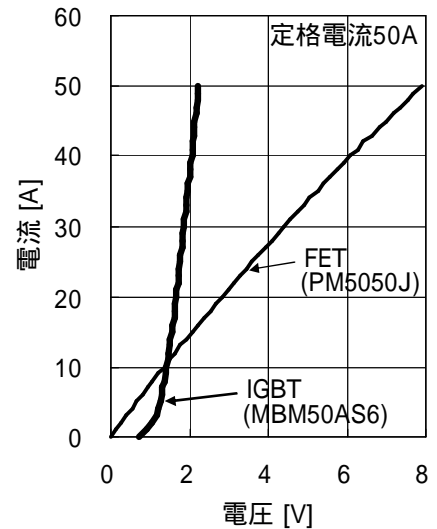


図 5 計算に用いた素子の V-I 特性

以上の計算結果から次のことが言えるでしょう。

スイッチ素子に FET を用いると不連続モードでの導通損失は非常に大であり、容量の大きな電源装置には使用できない。容量が小で電力効率に対する要求が厳しくない場合のみ使用できる。

例：数 10W 程度の充電器など

スイッチ素子に IGBT を用いると不連続モードでの導通損失の増加はかなり抑制される。しかし、IGBT を用いるのは電力効率に対する要求の厳しい容量の大きな電源に限られるので不連続モード 2 のような電流波形では使用できないだろう。

IGBT を用いて不連続モード 1 の波形なら容量の大きな電源装置でも使用できる可能性がある。よって、容量の比較的大きな電源装置（数 kW 程度）でも境界モード制御なら使用できる可能性がある。

リアクトル電流不連続モード制御高力率コンバータの研究開発動向

リアクトル電流不連続モード制御の高力率コンバータは 1990 年代に広く研究されました。カナダの Concordia 大学の P.D.Ziogas や Vienna 大学の J.W.Kolar などが特に沢山の論文を残しています（例えば文献(4)(8)(9)(10)）。日本でも沢山の大学や企業で研究されました（例えば文献(11)~(23)）。

当時はリアクトル電流連続モード制御高力率コンバータの専用制御 IC の種類が少なく、また高価であったので不連続モード制御は制御回路を簡略化できることに大きな魅力がありました。しかしその後、単相入力分野では連続モード専用制御 IC が各種市販されるようになり、価格も大幅に低下しました。今日では 100 円程度で入手できます。その結果現在では単相入力の高力率コンバータは「昇圧チョップパ型でリアクトル電流連続モード制御で専用の制御 IC を使用する」という方法が主流となっています。また、境界モード制御は制御回路が複雑になるので昔はあまり好まれませんでしたが、現在では専用の制御 IC が安価に市販されており、小容量分野で多数使用されています。通常の不連続モード制御は最近はあまり使用されていないようです。

3相入力では連続モード制御の適切な制御 IC がないので、不連続モードでの制御回路の簡略化は今でも魅力的ですが、3相入力の電源は全て容量が大きい(通常数 kW 以上)ので電流のピーク値が大きくなるのが致命的な欠点となります。また、3相入力では高調波電流の抑制が単にガイドラインを満足するだけでなく、さらに高いレベル(例えば高調波含有率 5%以下)を求められる場合が多く、図 1 のような通常の不連続モード制御では不十分となります。そこで 1990 年代に電流のピーク値抑制と高調波の低減を目的として多数の研究が行われました(例えば文献(3)~(7))。しかしながら目標を適切にクリアした実用的な回路方式は開発されませんでした。私も当時は電源メーカーに勤務しており、この分野の研究を行いました(3)、実用化には到りませんでした。現在では3相入力の高力率コンバータはいわゆる PWM コンバータが定番の回路方式となっています。(PWM コンバータ:スイッチ素子を 6ヶ使用、電流連続モード制御、多くはマイコンで制御)

また、電流連続モード、不連続モード共に 1990 年代にはソフトスイッチングの回路方式が多数研究されました(例えば文献(11)~(16))。しかし、実用化例はほとんどないと思われます。高力率コンバータはソフトスイッチングの不得意分野に該当します(24)(25)。

高力率コンバータは 1990 年代に広く研究されましたが、2000 年代は徐々に減少し、現在では一段落したような状況になっています。今の時点で振り返れば、これまでに非常に多数提案された新しい回路方式のうち実用化されたものはごく一部です。現在広く使用されている回路方式は昇圧チョップパ型連続モード制御や PWM コンバータなど昔からあったオーソドックスなものがほとんどのようです。多くの研究者の努力は一見無駄になったように思えますが、今後の変化は予測できません。自動車のパワエレ製品になりつつあるように、パワエレの応用分野はますます広がっています。1990 年代の不連続モード制御の技術も新たな分野で再登場するかもしれません。

参考文献

- (1) 平地研究室技術メモ No.20120626、「昇降圧チョップパ型高力率コンバータ」
- (2) 平地研究室技術メモ No.20120531、「昇圧チョップパ型高力率コンバータのリアクトル電流不連続モード制御」
- (3) 平地、岩本、山本、「3相入力不連続モード制御高力率コンバータの特性改善について」、パワーエレクトロニクス研究会論文誌、Vol.21, No.2, pp.13-23, (1996)
- (4) J.W.Kolar , H.Ertl , F.C.Zach , "A Novel Single-Switch Three-Phase AC/DC Buck-Boost Converter with High-Quality Input Current Waveforms and Isolated DC Output", Proceedings of IEEE International Telecommunications Energy Conference , pp.407-414 , September 1993
- (5) 松原正克、村井由宏、「三相正弦波入力整流回路の一方式」、パワーエレクトロニクス研究会論文誌、Vol.21, No.1, pp.101-108, (1995)
- (6) 白井、中野、難波江、「三相高力率コンバータに関する研究」、平成 6 年電気学会全国大会、pp.183-184
- (7) 荒井聖、中野博民、難波江章、「新しい単相入力電流正弦波整流回路の解析」、電気学会半導体電力変換研究会、SPC-93-67、1993 年
- (8) A.R.Prasad , P.D.Ziogas , S.Manias , "An Active Power Factor Correction Technique for Three-Phase Diode Rectifiers", Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists

- Conference , pp.58-66 , June 1989
- (9) S.Manias, P.D.Ziogas, "A novel sinewave in AC to DC converter with high-frequency transformer isolation", IEEE Tran. on Industrial Electronics, Vol. IE-32, No.4, pp.430-438, (1985)
 - (10) W.Kolar , Ertl , C.Zach , "A Comprehensive Design Approach for a Three-Phase High-Frequency Single-Switch Discontinuous-Mode Boost Power Factor Corrector Based on Analytically-Derived Normalized Converter Component Ratings", IEEE Transactions on Industry Applications , Vol.31 , No.3 , pp.569-582 , 1995
 - (11) 谷口 , 平地 , 入江 , "三相高力率コンバータのソフトスイッチング回路" , 電気学会論文誌 (D),Vol.117-2, pp.142-149,1997
 - (12) K.Taniguchi , T.Morizane , N.Kimura , H.Irie , K.Hirachi , "High-Performance Soft-Switched Three-Phase Converter with Sinusoidal Input Current and Unity Power Factor", Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference ,Vol.2 , pp672-678 , February 1997
 - (13) 長尾道彦、中原正俊、「ソフトスイッチング高力率 AC/DC コンバータ」, 電気学会半導体電力変換研究会資料、SPC-96-119、(1996)
 - (14) 篠原敏子、鳥井昭宏、植田明照、「単相昇圧型高力率コンバータの出力特性の解析」, 電気学会半導体電力変換研究会資料、SPC-96-59、(1996)
 - (15) 西川、五十嵐、野澤、黒木、「ZVS 方式スイッチング電源」, パワーエレクトロニクス研究会論文誌、Vol.25, No.2, pp.153-159、(1999)
 - (16) 能登原、二見、田原、遠藤、石井、「部分共振形アクティブコンバータの基礎検討」, 電気学会半導体電力変換研究会資料、SPC-92-40、(1992)
 - (17) 村木さおり、斉藤亮治、「スイッチ不連続モード 3 相 PFC におけるコンデンサ中点電位変化の入力電流波形改善効果」, 電子情報通信学会技術報告、EE98-24、1998 年 7 月
 - (18) 高橋勲、五十嵐康雄、「ディザー整流回路の解析とその応用」, 平成 3 年電気学会産業応用部門全国大会、No.128、pp.558-561
 - (19) 寺本進、関根正興、齋藤亮治、「高入力力率フォワード・コンバータ」, 電気学会半導体電力変換研究会資料、SPC-94-35、(1994)
 - (20) 荒川、石井、「スイッチング電源用簡易型力率改善モジュール」, 東光技術時報、第 6 号、(1993)
 - (21) 渡辺晴夫、小林義則、関根豊、森川雅人、石井卓也、「MS(Mag-Switch)方式電源」, 電気情報通信学会技術報告、PE94-9、(1994)
 - (22) 長尾道彦、中小原隆、陳野正仁、原田耕介、「単相高力率昇圧型 AC-DC コンバータの特性解析」, 電気学会論文誌(D)、114 巻 11 号、pp.1139-1148、(1994)
 - (23) 岩崎武司、関根正興、「力率改善型スイッチング電源」, オリジンテクニカルジャーナル、No.54、pp.27-32、(1991)
 - (24) 平地研究室技術メモ No.20060807、「ソフトスイッチングの得意分野と不得意分野」
 - (25) 平地克也、「ソフトスイッチング技術の最新動向」, 電気学会誌、Vol.125, No.12, pp.754-757 (2005)

以上