平地研究室技術メモ No.20180618

LLC コンバータの研究開発動向

（読んでほしい人：パワエレ技術者）

2018/6/18 舞鶴高専 平地克也

【あらまし】 LLC コンバータは、DC/DC コンバータの分野で現在最も研究が盛んな回路方式です。古くから知られた回路方式ですが、広く研究されるようになったのは最近です。20 年以上前に日本企業によって優れた研究発表が行われていますが、近年は日本の研究機関によるこの分野の研究は多いとは言えず、もっぱら海外の研究機関により多数の論文が発表されています。現在 LLC コンバータは家電用または OA 機器用として、数十 W～百数十 W の容量で広く使われていますが、最近はもっと大きな容量をねらった研究が増加しており、車載充電器や太陽光発電などの用途で数 kW クラスを想定した論文が多数発表されています。

■LLC コンバータの研究動向

表 1 に昨年（2017 年）の各種論文誌・論文集による LLC コンバータに関する論文の発表件数を示します。日本の学会の論文誌掲載はごくわずかですが、海外では多数の論文が発表されています。

表 1　各論文誌・論文集の LLC コンバータ関係の論文数（2017 年の実績）

論文誌・論文集（国際会議）	略称	論文数
電気学会 D 部門論文誌	電学論 D	0
パワーエレクトロニクス学会誌	PE 学会	1
IEEE Transacutions on Power Electronics	IEEE Tran. on PE	28
IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition	APEC	17
IEEE Energy Convertion Congress and Exposition	ECCE	19

電学論 D：パワーエレクトロニクス関係の論文誌の中で、日本では最も質と量が充実した論文誌。
PE 学会：日本で唯一のパワーエレクトロニクス専門の学会。
IEEE Tran. on PE：パワーエレクトロニクス関係では、世界で最も質と量が充実した論文誌。
APEC、ECCE：有名なパワーエレクトロニクスの国際会議。年 1 回開催。
IEEE：米国電気電子学会。世界の電気関係の技術者 40 万人を会員とする大きな学会。

表 2 に IEEE Tran. on PE に掲載された LLC コンバータの論文数の推移を示します。1992 年と 1998 年に各 1 本の論文が掲載されていますが、これらの論文は LLC という名称が使用されていますが、現在我々が LLC コンバータとして認識している回路方式とは別の方式です[1]。LLC コンバータは図 1 に示すように変圧器 1 次巻線 n_1 と直列に Cr と Lr、並列に Lm が接続されたものと考えられていますが、この回路方式に対して LLC コンバータの名称が定着したのは 2000 年代以降のようです。（なお、Lr は変圧器の漏れインダクタンス、Lm は励磁インダクタンスを使用することが多い）。したがって、IEEE Tran. on PE に掲載された初めての LLC コンバータの論文は 2005 年の論文[2]となります。

表２　IEEE Tran. on PE に掲載された LLC コンバータの論文数（合計 153）

年	1992	1998	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
論文数	1	1	1	1	2	1	1	3	8	10	15	18

年	2015	2016	2017	2018
論文数	18	24	28	20

（2018 年は 6 月 16 日時点の数）

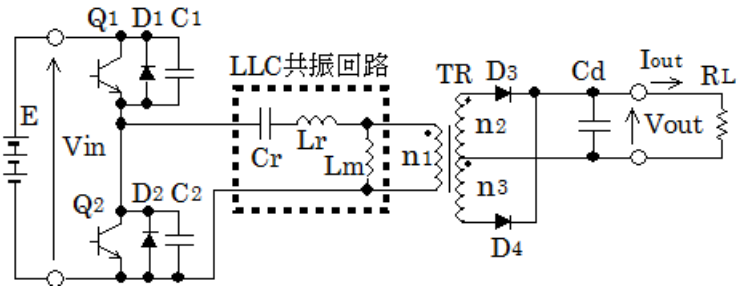

図１　LLC コンバータ回路例

なお、IEEE Tran. on PE に掲載されるには充分な推敲と査読後の修正が必要なので、掲載されるまでにかなり時間がかかります。APEC は Tran. on PE より敷居が低いので、研究成果を早期に発表でき、LLC コンバータの最初の論文は 2001 年に発表されています[3]。

表２から、LLC コンバータの研究は 2010 年代に入ってから急速に盛んになり、現在もまだ増加の傾向にあることが分かります。

表３に、これまでに IEEE Tran. on PE に掲載された LLC コンバータの国別論文数を示します。中国と韓国の研究機関が熱心に LLC コンバータを研究していることが分かります。なお、中国はパワーエレクトロニクス全般に対して国を挙げて注力しており、LLC コンバータに限らず、少なくとも論文の数では日本をすでに抜いていると思われます。

表３　これまでに IEEE Tran. on PE に掲載された LLC コンバータの国別論文数（2018/6/16 調査）

中国	アメリカ	韓国	カナダ	日本	イラン	台湾	香港	英国	フランス	スイス
42	38	27	19	6	4	3	3	2	2	2

（著者の所属する研究機関の存在する国を示す。1 つの論文が複数の国にまたがる場合もある。）

■LLC コンバータのルーツ

以上のように、図１の回路方式に対して LLC コンバータの名称が定着したのは 2000 年以降であり、今日のように研究が盛んになったのは 2010 年以降と言えます。しかしながら、図１の回路方式はすでに 1990 年代に日本の電源メーカ（サンケン電気）により実用化され、論文発表されています[4~7]。ただし、回路方式の名称は LLC コンバータではなく、Soft-switched Multi-resonant Zero-current-switching converter（略称 SMZ）と称しています。この名称はサンケン電気以外の論文では見られません。回路の動作を正確に表した名称ですが、長すぎるので嫌われたのかもしれません。2000 年頃から LLC という名称が使われ始め、定着することになります。

この回路方式が最初に発表された論文が気になりますが、現在私の知る限りでは最も古い論文は文献[4]ですが、1980 年代にいろんな共振回路が多数発表されているので、詳しく捜せばもっと古い論

文が見つかるかもしれません（名称はLLCでもSMZでもないでしょう）。

■LLCコンバータ普及の経緯と最近の研究開発動向

1990年代、サンケン電気はSMZ（LLCコンバータ）を「超低ノイズ電源」と称して、質の高いソフトスイッチング機能をセールスポイントとしています。電源の容量は数十W～百数十Wを対象としています。当時あまり広く普及しなかった理由はLLCコンバータの次の2つの大きな欠点によるものと思われます。

・出力電圧の制御範囲が狭く、入力電圧変動に弱い。

・励磁電流が大きく、スイッチ素子の導通損失が大きい。

2010年前後から急速な普及が始まりますが、これは2コンバータ方式のDDコンとしてPFCコンバータとペアで用いると、上記2つの欠点を軽減できることが広く知られるようになったためと思われます。そのため、LLCコンバータ制御ICの多くはPFCコンバータとの併用を前提として設計されています。また、制御ICには近年の多数の優れた研究成果が取り入れられ、便利な機能を沢山備えています。

現在LLCコンバータは家電用またはOA機器用として、数十W～百数十Wの容量で広く使われています。近年、もっと大きな容量を目標とした研究が増加しており、車載充電器や太陽光発電などの用途で数kWクラスを想定した論文が多数発表されています。これらの用途では広い電圧制御範囲が要求されますが、次のようなねらいでLLCコンバータの適用が検討されています。

・質の高いソフトスイッチング機能を生かして高周波動作させ、小型軽量化を実現する。

・回路の工夫により、なるべく広い電圧制御範囲を得る。

・近年の進歩したスイッチ素子を用い、励磁電流が増加しても導通損失は抑制する。

＜注：今回実施したLLCコンバータに関する論文数の調査方法＞

IEEE Explorerを用いて検索し、「LLC」と「Converter」を同時に含む論文をLLCコンバータに関係する論文と考えた。他の回路方式を主たるテーマとした論文で、LLCコンバータを比較対象にしたような論文も少し含まれる。また、LLCが著者の組織名で、たまたまConverterという言葉が記載されたような、LLCコンバータとは無関係の論文もごく一部ではあるが含まれる。

■参考文献

[1] Rui Liu, and C. Q. Lee, ”Series Resonant Converter with Third-Order Commutation Network”, IEEE Transactions on Power Electronics,Vol.7, No.3, pp.462-468, (1992)

[2] Yilei Gu, Zhengyu Lu, Lijun Hang, Zhaoming Qian, and Guisong Huang, “Three-level LLC series resonant DC/DC converter”, IEEE Transactions on Power Electronics,Vol.20, No.4, pp.781-789 , (2005)

[3] James F. Lazar, and Robert Martinelli, "Steady-State Analysis of the LLC Series Resonant Converter", Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC2001), pp.728-735

[4] Yasuhito Furukawa, Kouichi Morita, and Taketoshi Yoshikawa, "A High Efficiency 150W DC/DC Converter", Proceedings of IEEE International Telecommunications Energy

Conference (INTELEC 1994), pp.148-154
[5] 森田浩一、「他励式電流共振コンバータ」、日本能率協会 1995 年スイッチング電源システムシンポジウム、A-1-2
[6] Koichi Morita, "Novel Ultra Low-noise soft switch-mode Power Supply", Proceedings of IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC 1998), pp.115-122
[7] 細谷裕、「ノートパソコン用共振型アダプタ」、日本能率協会 1998 年スイッチング電源システムシンポジウム、C-1-3

以上