

E 級増幅器の ZVS 動作予測法

泉川 周也[†]
Syuuuya Izumikawa

末次 正[†]
Tadashi Suetsugu

1. はじめに

E 級増幅器は高い効率性で動作する回路として知られている。これはスイッチ電圧とスイッチ電圧勾配はスイッチがターンオンした瞬間[1]にゼロとなるためである。特に、最も大切な特徴は、ターンオンでゼロ電圧スイッチング(ZVS)である。しかしこの ZVS 状態はいつも満足できるわけではなく、例えば、もし負荷抵抗が非常に大きい場合や、スイッチング周波数が非常に高い場合[2]には満足されない。これは効率性を決定的に低下させる。しかし、E 級増幅器が ZVS 状態で動作するかどうか自動的に予測する方法は存在しなかった。

この論文で、ZVS がスイッチとシャントキャパシタの電流波形を観測する事で、ZVS 動作をするかどうかを予測する方法を提案する。この予測方法は判定回路として実装されて $D = 0.5$ で動作する E 級増幅器で動作が確認される。

2. E 級増幅器の ZVS 動作

ZVS 動作と非 ZVS 動作の E 級増幅器の波形を説明する。さらに、ZVS 状態を示すパラメータを導出する。E 級増幅器の基本回路は図 1 に示す。入力電流 I_{DD} はチョークコイルのため一定である。出力電流 i_o はサイン波である。なぜなら出力共振回路の Q 値が高いためである。スイッチがオ

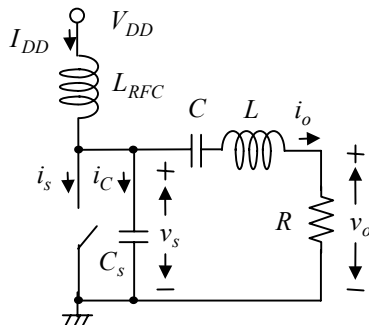


図 1. E 級増幅器の基本回路

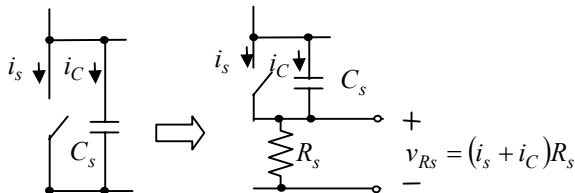


図 2. 電流検知回路.

フのとき、つまり $0 < t \leq 0.5T$ のとき、シャントキャパシタ電流は

$$i_c = I_{DD} - I_m \sin(\omega t + \phi)$$

となる。スイッチがオンのとき、つまり、 $0.5 < t \leq T$ のとき、シャントキャパシタ電流は

$$i_s = I_{DD} - I_m \sin(\omega t + \phi)$$

はとなる。従って、シャントキャパシタにかかる電圧は

$$v_s = \frac{1}{C_s} \int_0^t i_c dt = \frac{1}{C_s} \left[I_{DD} t + \frac{I_m}{\omega} \cos(\omega t + \phi) - \frac{I_m}{\omega} \cos \phi \right]$$

$$= \frac{1}{\omega C_s} [I_{DD} \omega t + I_m \cos(\omega t + \phi) - I_m \cos \phi]$$

となる。

$$x = \pi I_{DD} - 2I_m \cos \phi$$

$$= \frac{\pi - 2}{2} (i_{s \max} + i_{C \min}) + 2i_s(0.25T)$$

x は $v_s(0.5T)$ で同じ符号となる。従って、 x が正であれば非 ZVS を予測し、負であれば ZVS を予測する。

3. 予測法を実行する判定回路

x の符号を検知する回路を説明する。もしセンスレジスタンス R_s が、図 2 に示すようにスイッチとシャントキャパシタの並列回路と直列に組み込まれれば、シャントキャパシタ電流とスイッチ電流は測定できる。この抵抗は ZVS 予測回路の動作に影響しない。しかし抵抗値は小さくしなければいけない。なぜならこの付加抵抗は増幅器の動作全体に影響を与えるかもしれないからである。

x の計算は図 3 に示すようにオペアンプで得られる。セン

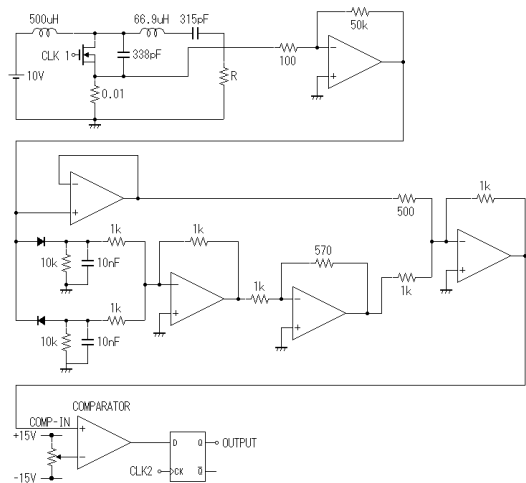


図 3. ZVS 予測回路

[†] 福岡大学大学院工学研究科電子情報工学専攻

スレジスタによって検知される電流は電圧フォロア、最大値検知回路、最小値検知回路へ送り込まれる。これらの最大値と最小値はそれぞれの周期でほぼ一定だと考えられるので、最大値検知回路と最小値検知回路はダイオードとローパスフィルタで構成される。最大値検知回路と最小値検知回路のダイオードの接点電圧のエラーはお互いを打ち消しあいゼロになる。最大値と最小値を加えた結果は増幅され、その後電圧フォロアから波形に加えられる。この波形はコンパレータ(比較器)を通り運ばれる。 x の符号は、 $t = 0.25T$ の立ち上がりエッジで D-FF の LOAD を利用して得られる。理論上、コンパレータの基準電圧はゼロであるが、可変抵抗はオフセット調節に用いられる。

4. シミュレーション結果

図3に Pspice による回路のシミュレーション結果を示す。シミュレーション中で用いられた MOSFET は IRF150 であり、使用したダイオードは DIN914 であった。動作周波数は 1.1MHz であり、オペアンプは理想モデルを使用した。図4が示すのはスイッチ電圧波形 v_s と、 $R = 5\Omega$ と $R = 40\Omega$ のコンパレータ入力波形である。図5が示すのは、負荷抵抗に対する x である。シミュレーションにおいて、最適となる E 級動作は $R = 12\Omega$ で達成され、ZVS は $R < 12\Omega$ で達成され、ZVS が $R > 12\Omega$ では達成されなかった。図5で、 x は R で単調増加し、 $R = 12\Omega$ でゼロ軸と交わる。コンパレータがこの値で実行されたとき、ZVS が達成されたとき 0 が出力され、ZVS が達成されなかったとき 1 が出力される。図6が示すのは、 $v_s(0.5T)$ に対する x である。この図では x が負のとき、 $v_s(0.5T)$ はゼロになっている。この理由は負のスイッチ電圧が MOSFET ボディダイオードでゼロに固定されるからである。しかし、 x が正のときは $v_s(0.5T)$ は x に比例して増加していることがわかる。

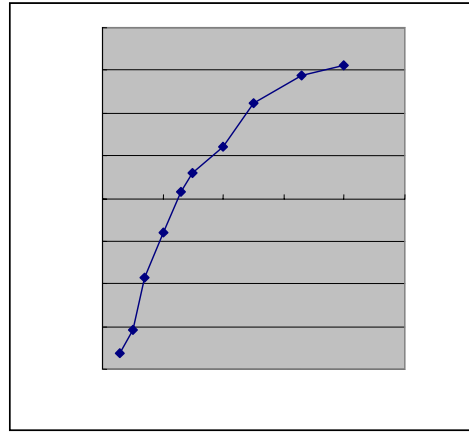


図5. x versus R .

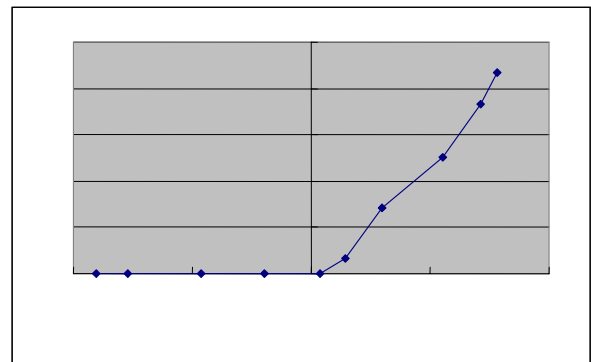
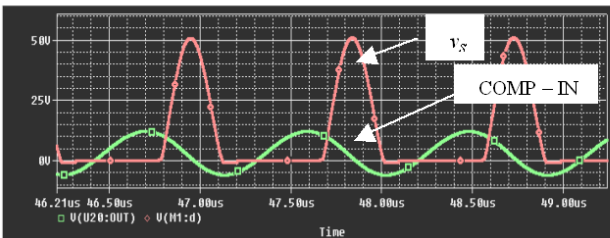
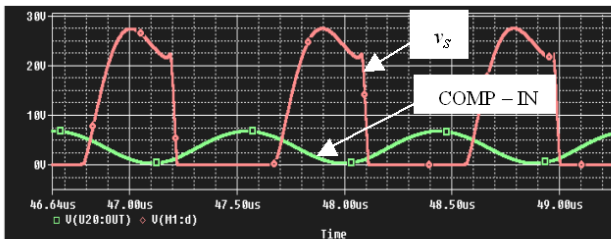


図6. $v_s(0.5T)$ versus x .



(a)



(b)

図4. v_s (スイッチ電圧波形) と COMP-IN (コンパレータ入力)のシミュレーション波形. (a) $R = 5\Omega$. (b) $R = 40\Omega$. (time scale: $0.1\mu\text{s}/\text{div}$; voltage scale: $2.5\text{V}/\text{div}$).

5. 結論

この論文では、E 級増幅器の ZVS 状態を予測する方法が示された。この方法は単純なアナログ・デジタル回路によって実現される。そのシミュレーション結果によれば、提案された回路は正確に ZVS 状態を予測することができる。

6. 参考文献

- [1] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class E-A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-10, pp. 168-176, June 1975.
- [2] M. K. Kazimierczuk and D. Czarkowski, *Resonant Power Converters*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.