テクニカルノート

模型回路による方形波インバータ式X線装置の動作特性

小 倉 泉・安 部 真 治・加 藤 洋

青 柳 泰 司

東京都立医療技術短期大学診療放射線学科

(論文受理 1991年3月4日)

(最終論文受理 1991年6月10日)

(Code No. 040, 080, 491-2)

Key words : Square wave inverter, Model circuit, Simulation, Circuit analysis

OPERATING CHARACTERISTICS OF THE SQUARE WAVE INVERTER
X-RAY GENERATOR BY THE MODEL CIRCUIT

IZUMI OGURA, SHINJI ABE, YOH KATOH

TAIJI AOYAGI

Division of Radiological Technology, Tokyo Metropolitan College of Allied Medical Sciences

(Article received ; Mar, 4, 1991)

Summary

Inverter X-ray generators are now becoming increasingly popular, because they such advantages as control of the high accuracy and miniaturization of high voltage transformer when compared with the usual singlephase and three-phase X-ray generators. However, it is difficult to understand the characteristics of the basic performance of this type, the primary circuit component is complicated compared with the usual X-ray generators. Also it is very difficult to obtain inverter X-ray generators quickly for teaching institutions.

Therefore, we tried to make a model circuit for the square wave inverter X-ray generator, so as to perform an analysis of the basic performance of the circuit composition from the power supply to the X-ray tube.

As the result, we could observe waveforms of each of the component circuits using this model circuit, and making it easier to understand the characteristics of the basic performance of this type. In the present report, we made clear the relation between load, circuit constant and output waveform by the simulation method, and studied the improvement method of performance characteristics of this type.

1. はじめに

インバータ式X線装置では入力からX線管に至るまで
完全な電子制御が行えるため、1次側制御のX線装置と

しては従来の単相及び三相装置に比較して高速・高精度の制御が可能となった。さらに、インバータ周波数の高周波化による高電圧発生装置の小型軽量化など優れた点が多いため、現在急速に普及している^{1,2)}。

しかし、この方式は従来の装置に比較すると 1 次側での回路構成が複雑なため、その基本動作を正しく理解し把握することは難しい。さらに、この目的のために X 線装置の 1 次側各回路を測定するには絶縁した特殊な計測器等を必要とする。また、教育機関等でもこれらの新しい技術に対応する必要に迫られているが、早急にインバータ式 X 線装置を購入することは非常に困難である。

そこで、電源入力から X 線管に至る構成回路の基本動作についての理解を容易にする目的で、方形波インバータ式 X 線装置の模型回路を試作した。

この結果、模型回路により各構成回路内の波形観測が可能となり、電源入力から X 線管までの各回路の電気的な関係や負荷条件の変化に対する出力波形の関係等を把握することが容易となった。また、本模型回路は動作電圧が低いため安全に各部の現象を観察することができ、卒業教育における基礎的知識の習得や教育機関での学生実験用としても有用である。さらに、構成回路の各定数と出力波形の関係をシミュレーションすることも容易なため、本報ではこれらの結果を基に実際の X 線装置における動作特性の改善について検討を試みた。

2. 方法および結果

模型回路の出力については基本動作の測定を安全に行

うため、管電圧を実際の装置に対して 1/1000 の大きさとした。また、管電流については実際の装置と同程度とし、60 W, 150 V, 400 mA, 0.1 s を得ることを目標とした。

Fig. 1 に試作した方形波インバータ式 X 線装置模型回路の回路構成をブロック図で示す。

2.1 主回路及び加熱回路

実際の X 線装置の電源は通常 200 V の単相または三相交流を整流・平滑および安定化し、300 V 前後の直流電圧を 1 次回路に供給している^{1,2)}。本模型回路の電源については製作を簡略化するため、市販されている入力 AC100 V, 出力 DC48 V, 1.6 A, 75 W 定格の直流安定化電源回路を使用し、直流入力とした。

チョップパ回路は制御素子にトランジスタを用い、チョップパ制御回路からの制御信号によりチョップパ周波数を 4 kHz に設定するとともに、パルス幅変調により方形波出力のデューティ比を 20~80% に可変している。

フィルタ回路はインダクタンス L_f 、コンデンサ C_f 、ダイオード D_f で構成した。チョップパ回路の ON 期間では L_f を経由して電源から負荷に対して電力が供給されるとともに C_f は充電される。また OFF 期間では負荷に対して C_f から電荷が放出されるとともに L_f に蓄積された磁気エネルギーが D_f を通って負荷に供給される。ここでデューティ比が大きいほど ON の時間が長くなるが、 L_f の作用によりここを通過する電流は ON の時間に比例して増加するため C_f の充電電圧も高くなる。この結果チョップパ出力のデューティ比に比例し、チョップパ周波数で脈動する直流電圧を出力する²⁻⁴⁾。この電圧が主変圧器

Fig. 1 Block diagram of the model circuit.

模型回路による方形波インバータ式X線装置の動作特性 (小倉・他)

の1次電圧となるため、チョップ回路のデューティ比により管電圧が決定されることになる。Fig. 2にチョップ回路のデューティ比を変化させたときのフィルタ回路出力電圧波形を示す。この波形からデューティ比に比例してフィルタ出力電圧が大きくなることがわかる。

インバータ回路は制御素子にトランジスタを用いてフルブリッジで構成し、周波数を2 kHzとした。フルブリッジインバータではTr1とTr3, Tr2とTr4をそれぞれペアで制御しており、一方のペア・トランジスタがONならば他方はOFFとなる。したがってこれらを交互にスイッチングさせることにより、インバータ回路の出力端子にはフィルタ回路の直流出力電圧を波高値とする、周波数2 kHzの方形波交流電圧が発生する。Fig. 3にインバータ回路の出力電圧波形(主変圧器の1次電圧波形)を示す。

実際の方角波インバータ式X線装置では1次電圧の周波数を200 Hz～20 kHz程度で使用しているため、主変

圧器の小型化が可能となる。ここで、変圧器の誘起起電力 e を表す基本式を示す^{1,2,5)}。

$$e = K \cdot f \cdot B \cdot A \cdot N (V) \quad (1)$$

K : 定数 f : 周波数 B : 磁束密度

A : 鉄心断面積 N : 巻線の巻数

本模型回路ではインバータ周波数が2 kHzのため、 K , B , A が一定ならば商用周波数の変圧器に比較して巻線の巻数 N が1/40で済むため全体としてかなり小型軽量となる。実際には周波数 f を高くするため変圧器の鉄心材料に周波数特性の良いフェライトを使用した⁶⁾が、商用周波数で使用されているけい素鋼板に比較して磁束密度 B が1/3～1/4程度しか得られない。したがって、(1)式より巻数 N は1/10程度となり、自作した高周波変圧器の重量は200 g前後となった。すでに単相装置模型回路で使用している商用周波数の変圧器の重量は約1.200 gのため⁶⁾、高周波化により主変圧器の小型軽量化が可能となる。

模型回路では主変圧器の2次電圧をブリッジダイオードにより全波整流して出力としているが、実際のX線装置ではX線管に電力を供給するために高電圧ケーブルを使用している。このケーブル自身には250 pF/m前後の静電容量があるため、模型回路においても出力端子に対し並列にケーブル等価容量 C_c を接続する必要がある。ここで、実際のX線装置のケーブル長を16 mとすると、高電圧ケーブル一本当たりの静電容量は

$$250 \text{ pF/m} \times 16 \text{ m} = 4000 \text{ pF} \quad (2)$$

となる。実際には、アース電位に対してプラス側とマイナス側にケーブルを接続するため、X線管両端の合成静電容量は2000 pFとなる^{1,5)}。ここで本模型回路では管電流を実際の装置と同等に設定し、管電圧のみ1/1000としているためケーブル等価容量 C_c は

$$2000 \text{ pF} \div 1/1000 = 2 \text{ } \mu\text{F} \quad (3)$$

前後となる。

負荷であるダミーX線管にはすでに単相模型回路で使用している大電流用直熱形整流管の5U4GBを使用した⁶⁾。ここで本模型回路の定格出力は60 Wであるが、この2極真空管は陽極損失が30 W (両極並列接続)のため、設定時間が10 ms以上の場合には150 V, 200 mA前後が出力の限界となる。しかし設定時間が10 ms以下では150 V, 400 mA程度の通電は可能である。

フィラメント加熱については実際の装置では125 Hz～1 kHzの方角波加熱を行っている¹⁾。本模型回路は1～10 ms程度の短時間における波形観測を目的としており、加熱周波数の影響による管電流波形の変動を抑える

Fig. 2 Output voltage waveforms of the chopper and the filter circuits.

Fig. 3 Output voltage waveforms of the inverter circuit.
(Primary voltage waveforms of the main transformer)

ため 4 kHz の方形波交流加熱とした⁵⁾。これにより加熱回路の回路構成は主回路に近いものとなるが、回路を簡素化するため直列ドロップ方式の安定化電源回路からインバータ回路へ直流電力を供給する方式とした。また、ダミー X 線管は加熱電流の安定に長時間を必要とするため連続加熱とし、加熱変圧器を使用せずにインバータの出力を直接フィラメントに印加する構成とした。

Fig. 4(a) に示す波形は今回模型回路を試作する際にモデルとした実際の装置における 120 kV, 320 mA, 10 ms の出力波形であり、**(b)** には模型回路での 120 V, 320 mA, 10 ms の出力波形を示す。

Fig. 4 Comparison of the output waveforms of a practical X-ray equipment and the model circuit.

2.2 制御回路

本模型回路の制御回路はタイマ回路からの出力信号により動作を開始する。タイマ回路はタイマ用 IC である NE555 に CR を付加した単安定マルチバイブレータで構成し、設定時間を 1 ms~1000 ms の 12 ステップとした。ここで EXP. SW の ON により出力端子③には設定した時間だけ +5 V の直流信号が出力され、この信号により基準発振回路、チョップ制御回路、アナログスイッチ回路が起動する。

基準発振回路は、タイマ用の IC の NE555 に CR を付加した無安定マルチバイブレータで構成した。発振周波数は 4 kHz で、タイマ回路からの制御信号により発振を開始する。この発振出力はチョップ制御回路および 1/2 分周回路に伝達される。チョップ制御回路についてはタイマ用 IC の NE555 を用いたパルス幅変調 (PWM) 回路で構成した。この回路もタイマ信号により起動し、基準発振回路からの基準信号に同期して出力信号周波数は 4 kHz に設定される。さらに変調入力端子⑤に 1.0~3.6 V の直流電圧を印加することにより方形波出力のデューティ比を 20~80% に制御している。そして、この方形波出力信号をホットカプラ回路の Pc3 に加えることによりチョップ・トランジスタを駆動する構成となっている。

次に、基準発振回路から 1/2 分周回路に加えられた 4

kHz の基準信号は双安定マルチバイブレータにより周波数 2 kHz の互いに反転した 2 つの出力信号 Q, $\bar{Q}$ に分割・分周される。この 2 つの信号をホットカプラ回路 Pc 1, Pc 2 を通じて、フルブリッジインバータの Tr 1 と Tr 3, Tr 2 と Tr 4 のペア・トランジスタに加えればインバータ回路は動作する。しかし、インバータ回路のトランジスタには OFF 時の遅れ時間 (ターン・オフ時間) があるため、このままではフルブリッジインバータの縦方向で短絡が起きる。これを防止するためインバータに使用しているトランジスタの ON タイミングに遅れ時間 (デレイタイム) を設ける必要がある^{3,4,7)}。そこで AND 回路と CR およびダイオードで構成したデレイタイム発生回路により約 20 μ s のデレイタイムを発生させている。このため、インバータの最高周波数は半導体制御素子のターン・オフ時間により制限されることになる¹⁾。

インバータ式 X 線装置の大きな特徴として高速で高精度の制御が挙げられるが、本模型回路でも管電圧についてはフィルタ出力電圧の検出によるフィードバック制御を切り換えにより選択できる。**Fig. 5** はフィードバック制御の有無による出力波形および 1 次側回路の波形を比較したものである。軽負荷においてフィードバック制御を行わない場合には (c) のように、投入時から定常時までチョップのデューティ比は小さく一定なためフィルタ出力電圧の上昇速度は遅くなる。したがって (a) のように管電圧の立ち上がり時間は 10 ms 前後となる。しかし、フィードバック制御を行った場合には (d) のように投入直後におけるチョップのデューティ比は最大となるためフィルタ出力電圧の上昇速度も速くなり (b) のように立ち上がり時間は 1 ms にまで改善される。また定常時での管電圧の変動も低減されることになる。

Fig. 6 に主回路及び加熱回路の外観を示す。

Fig. 5 Comparison of voltage waveforms of the circuits regarding feedback control.

模型回路による方形波インバータ式X線装置の動作特性 (小倉・他)

Fig. 6 Appearance of the model circuit. (upper : main circuit, lower : heating circuit)

2.3 管電圧, 管電流波形

Fig. 7 に管電圧120 V, 設定時間10 ms で管電流を変化させた時の出力波形を示す。この波形から管電流が大きいほど管電圧波形の立ち上がり時間が長くなり、リプル百分率も増加することがわかる。管電圧の立ち上がり時には負荷に電力を供給するとともに、フィルタ容量とケーブル等価容量に充電が行われる。また、この時にはフィードバック制御により電源からチョップ回路に対して許容最大電力が供給されるが、大負荷ほど負荷に供給する電力の割合が増加するため立ち上がり時間は長くなる。リプル百分率についてはこの方式のインバータ装置では

Fig. 7 Output waveforms as a result of different valves for tube current.

インバータの周波数が一定なため、管電流が大きくなるほどケーブル等価容量 C_c による平滑効果が減少し、同時にフィルタ出力電圧のリプルも増加するためリプル百分率は増加する¹⁾。また、管電流が小さいほど管電圧波形の立ち下がり時間は長くなっているが、これは設定時間終了後にケーブル等価容量 C_c の残留電荷がダミーX線管を通して放電するためであり、管電流が小さいほどダミーX線管の内部インピーダンスは大きくなるため放電時の時定数 CR は大きくなり放電時間が長くなる。

Fig. 8 に主回路, Fig. 9 に加熱回路の回路図を示す。

Fig. 8 Circuit diagram of the main circuit.

Fig. 9 Diagram of the heating circuit.

2.4 回路定数と出力波形の関係

方形波インバータ式X線装置において出力波形に影響を与える回路定数としては種々の要素が考えられる。そこで今回、比較的变化が容易なフィルタ容量 C_f およびケーブル等価容量 C_c について出力波形との関係を測定した。

Fig. 10 は管電圧100 V においてケーブル等価容量 C_c を変化させたときの出力波形であり、ケーブル等価容量 C_c が小さいほど立ち上がり・立ち下がり時間は短くなるが、リップル百分率は増加している。

Fig. 11 は管電圧100 V、管電流400 mA においてフィルタ容量 C_f の違いによる投入時の出力波形とチョップ及びフィルタ出力電圧波形を比較したものである。フィルタ容量 C_f が大きいと投入直後の電圧上昇は遅いが、チョップがOFFの時に電圧降下が小さいため3パルス目付近から電圧の上昇速度は速くなり、結果的に立ち上がり時間は短くなる。そして定常時においてもフィルタ出力電圧のリップルは小さくなるためリップル百分率も小さくなる。また、フィルタ容量 C_f が50 μF を越えるあたりから立ち上がり時間は一定となるが、250 μF を越えると電源容量等の制限により長くなる傾向が見られた。この結果、本模型回路において出力波形が実際の装置と等価になる回路定数は、 C_f が100 μF 、 C_c は4.7 μF であった。

3. 考 察

本模型回路のシミュレーションにより求めたフィルタ容量及びケーブル等価容量と出力波形の関係を基に、実

Fig. 10 Output waveforms as a result of different values for cable capacitance.

Fig. 11 Voltage waveforms of circuits for different values of filter capacitance.

際の装置における出力波形の改善について考えてみる。

実際のX線装置における管電圧波形については、高いX線出力とmAsの直線性を必要とすることから、理想的には全ての負荷に対し立ち上がり・立ち下がり時間が零で定常時には完全な直流となる方形波が望ましい。

立ち上がり時間についてはFig. 10, 11の結果から、ケーブル容量を小さくして、フィルタ容量を電源容量に対して適切な値に設定すれば短時間化が可能である。しかし線路等のインピーダンスが低い場合フィルタ容量の大容量化により投入時にはパルス状の大電流が流れ、チョップパやインバータに使用している半導体素子を破壊する。模型回路では線路のインピーダンスが高いにもかかわらず、投入時の1次電流最大値は定常時平均値の7倍前後にも達する。実際の装置ではフィルタ回路のインダクタンス L_f により投入時の1次電流を半導体素子の限界内に抑え、チョップパのデューティ比をフィードバックやソフトウェア等で最適に制御することにより、立ち上がり時のオーバーシュートを抑え、1~2msの立ち上がり時間を実現している。このため、さらに立ち上がり時間を短くするには大容量の半導体素子が必要となる。

リップル百分率についてはケーブル容量を大きくして平滑効果を上げるとともに、フィルタ出力電圧のリップルを減少させる目的でフィルタ容量を大きくすることにより低減できる。また、チョップパ及びインバータの周波数を高くすることによってもリップル百分率の低減は可能である。しかし制御素子にトランジスタを使用した場合、ターン・オフ時間の関係からインバータ周波数は5~10kHz程度が限界と考えられる。このためインバータ周波数の高周波化には、より高速の半導体素子が必要となる。また、これにともない主変圧器はさらに小型化が可能となるが、鉄心材料の周波数特性や絶縁等の問題が生じてくる。

立ち下がり時間はケーブル容量のみに依存されるため可能な限り小さくする必要がある。しかし、これによりリップル百分率は増加することになる。

以上のことから、方形波インバータ式X線装置において現在の回路構成を変更せずに出力波形を改善するには、立ち上がり・立ち下がり時間を短くするためにケーブル容量を小さくし、リップル百分率を低く抑えるためにフィルタ容量を大きくするとともに、チョップパ及びインバータ回路の周波数を高くすることにより可能と考える。

4. 結 語

今回試作した方形波インバータ式X線装置の模型回路では、実際のX線装置の基本特性にかなり近いものが得られたと考える。これにより構成回路の各定数と出力波形の関係や主回路および制御回路での基本的な故障による異常現象等についてもシミュレーションが可能となった。しかし、実際の装置において出力波形に影響する因子は数多いため、今後これらについてもさらに検討を重ねて行きたい。

実際のX線装置については、チョップパおよびインバータ周波数の高周波化とケーブル容量の低減等により一層の高性能化が期待できる。しかし、これらの実現には半導体制御素子の大容量化および高速化と、高周波に対応できる主変圧器の開発が大きく影響することを確認した。

現在生産されている方形波インバータ式X線装置については今回試作を行った方式以外にも各種の方式があり、各装置メーカーともより良い装置を目指して研究開発を行っている。今後は共振形インバータを含めこれらの方式についても基本動作を解析し、動作特性の改善について検討する目的で模型回路の試作を進めていきたい。

なお、本稿の要旨については第18回秋季学術大会において発表した。

文 献

- 1) 青柳泰司：インバータ式X線装置の特性と臨床効果 2. 動作特性。日放技学誌, **46**(12), 1885-1990, (1990)。
- 2) 青柳泰司：放射線機器工学 I, p. 213-217, コロナ社, 東京, (1989)。
- 3) 長谷川彰：スイッチング・レギュレータ設計ノウハウ, p. 18-21, CQ 出版社, 東京, (1985)。
- 4) 白庄司進, 戸川治朗：スイッチングレギュレータの設計法とパワーデバイスの使い方, p. 9-10, p. 64-65, p. 113, 誠文堂新光社, 東京, (1985)。
- 5) 青柳泰司：診断用X線装置, p. 164-181, p. 190-191, p. 259-260, p. 302-306, コロナ社, 東京, (1979)。
- 6) 田中 仁, 他：医用放射線技術実験 基礎編, p. 183-186, 共立出版, 東京, (1990)。
- 7) 村上義介：AC モータの制御とインバータ技術。トランジスタ技術, (12), 485-500, (1988)。