

第3章 X線の生成

3.1 X線高電圧装置

X線高電圧装置の主な機能はX線管(X-ray tube)へ高電圧の直流電流を供給することである。そしてこの装置の主な構成は変圧器である。変圧器は電磁誘導を利用して一次(入力)側の電圧を大きく、または小さくして二次(出力)へ出力する装置である。

3.1.1 変圧器

変圧器(transformer)はトランスとも呼ばれ、電磁誘導の原理を用いて一次側の交流電圧を大きくしたり小さくして二次側へ出力電圧として変える働きをする。一般的な形の変圧器は共通した鉄心に一次側と二次側に隔てて絶縁された導体のワイヤが巻かれている(図3・1)。一次側コイルに交流が供給されると、電流方向と電流の大きさが交互に変化するために、交流磁場が生じる(磁場の方向と大きさが交互に変化する)。一次側で生じた交流磁場は鉄心を通して二次側へ伝導する。二次側のコイルは鉄心を伝導してきて交流磁場により交流電流が生じる。そして一次側と二次側のコイルの巻き線比は、一次側と二次側の電圧比に等しくなり、これらの関係を下式に示す。

$$V_p/V_s = N_p/N_s \dots\dots\dots(3 \cdot 1)$$

ここで、

V_p : 一次側の電圧

V_s : 二次側の電圧

N_p : 一次側の巻き線数

N_s : 二次側の巻き線数

変圧器は $N_s > N_p$ のとき、昇圧トランス(step-up transformer)と呼び、二次側電圧が一次側電圧より大きくなり、 $N_s < N_p$ のとき、二次側電圧が一次側電圧より小さくなり、降圧トランス(step-down transformer)という。

電力は単位時間あたりの消費エネルギーまたはエネルギー生成の割合である。電力に関するSI単位はワット[W]で、1[W]は1秒間[s]あたり1ジュール[J]のエネルギーの仕事量として定義される。電力 W [W]は電圧 V ボルト[V]と電流 I アンペア[A]の積に等しく、これらの関係を下式に示す。

$$W = I \cdot V \dots\dots\dots(3 \cdot 2)$$

【問題3-1】 ある変圧器で一次側と二次側の巻き線比が1：1000である。このとき、一次側に100[V]の交流を供給したとき、二次側で発生する電圧を求めよ。また、一次側に10[A]を流したとき、二次側に流れる電流を求めなさい。

(答)
 3・1式より $100/V_s = 1/1000$
 $V_s = 100000[V] = 100[kV]$
 3・3式より $100 \times 10 = 100000 \times I_s$
 $I_s = 10[mA]$

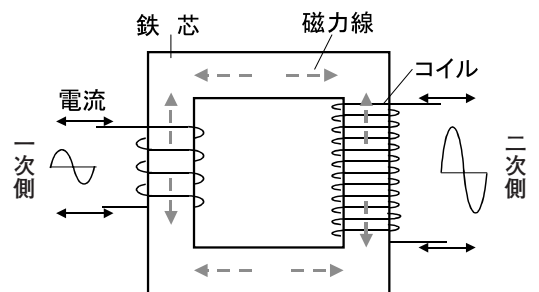


図3・1 変圧器

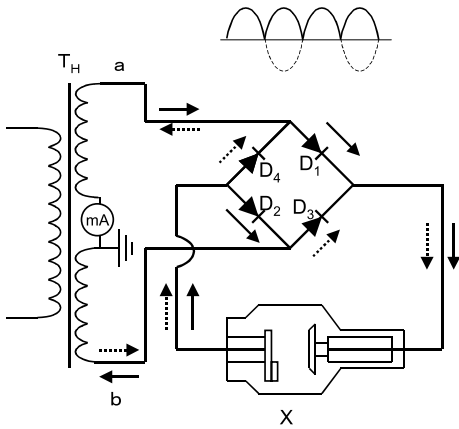


図3・2 単相2ピーク形X線高電圧装置回路図

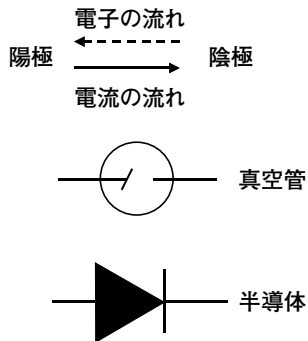


図3・3 ダイオードの記号

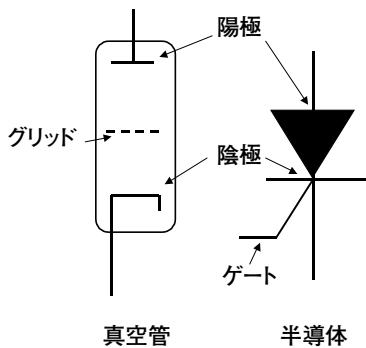


図3・4 トリオード

理想的な変圧器では一次側と二次側の電力が等しく、このことは一次側と二次側の電圧 V と電流 I の積が等しくなることで、このときの関係を下式に示す。

$$V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s \dots\dots\dots (3 \cdot 3)$$

ここで、

- V_p : 一次側の電圧
- I_p : 一次側の電流
- V_s : 二次側の電圧
- I_s : 二次側の電流

実際には変圧器の二次側で効率低下により電圧と電流に損失が生じる。

X線変圧器では二次側の巻き線の中央にアース結線がされている(図3・2)。もし二次側の出力電圧が150[kV]の場合、陽極には+75[kV]、陰極には-75[kV]が負荷されることになり、高電圧系での電氣的絶縁に関する問題が小さくなる。

乳房撮影用X線管球では陽極がアース電位に保たれて、陰極はアース電位に対しマイナスの電圧が負荷されている。

3. 1. 2 整流器

整流器(rectifier)でダイオード(2端末)、トリオード(3端末)、テトロード(4端末)などは電気回路において電流をコントロールする機器である。ダイオードは半導体または真空管で、トリオード、テトロードなどは真空管である。

ダイオード(diode)で真空管や半導体の記号を図3・3に示す。電子は陰極から陽極へ向けて流れるが、電流の流れる方向は電子の流れの反対方向なので、半導体の矢印は半導体を流れる電流の向きを示している。

ダイオードは陽極から陰極へ電流が流れ、反対方向へは流れない整流作用をする。トリオード(triode)は陽極と陰極の間に電流をオン、オフと調節するための第3の電極を備えている(図3・4)。第3の電極をグリッドと呼び、陰極から陽極へ向かって加速される電子は必ずグリッドを通過する。そしてグリッドに少量のマイナス電圧が負荷されると、陰極から放出された電子はグリッドで止まってしまい、電流が流れなくなる。

テトロード(tetrode)はトリオードよりさらに1個多い電極を加えている。

X線管球自体もその機能はダイオードの一種で、陰極がマイナスで陽極にプラス電位が負荷されているとき、陰極の過熱により放出された電子は陽極に向かって加速され、陽極から陰極へ向けて電流が流れる。そして陽極と陰極の極性が反対になると、陽極は電子を放出しないために電流が流れない。

3. 2 X線高電圧回路

3. 2. 1 単相2ピーク形X線高電圧装置

X線管は陽極に正の電圧が陰極に負の電圧が負荷されたときにしか電流が流れないので、X線発生装置では高圧変圧器で二次側が高電圧に変えられた後、整流器を用いて交流を直流に変えてX線管に電力を供給している。

図3・2に単相2ピーク形X線高電圧装置の回路図を示す。この図で T_H は高圧変圧器、 $D_1 \sim D_4$ はダイオード、XはX線管を示す。

交流の最初の半サイクルで高圧変圧器のa側(実線矢印)で高電圧が発生したとすると、電流は D_1 、X、 D_2 を流れる。後の半サイクルでは電圧極性が反対となり、b側(破線矢印)で高電圧が発生したとすると、電流は D_3 、X、 D_4 を流れる。このようにX線管にはいつも陰極が負に陽極が正に保たれ、陰極・陽極間に電流が流れるとX線が放出される。

このようにしてX線束は高圧変圧器の極性に関係なく、交流の1サイクルあたり2パルス発生される。図3・5に単相2ピーク形X線高電圧装置によりつくられる電圧と電流波形を示す。

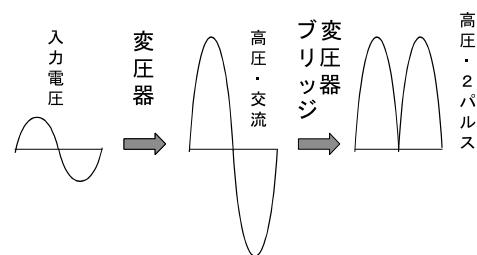


図3・5 単相2ピーク形X線高電圧装置による電圧波形

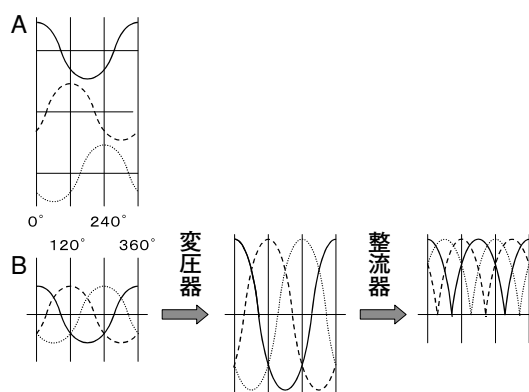


図3・6 3相6ピークX線高電圧装置による電圧波形

3. 2. 2 3相6ピーク形X線高電圧装置

3相6ピークX線高電圧装置は3相の交流電源を使用する。3相交流は1サイクルの間に 0° 、 120° 、 240° ではじまる3ピークの電圧波形を示している(図3・6A)。

本装置の回路図を図3・7に示す。高圧変圧器は一次側が Δ に、二次側がYに結線されている。整流器6個を使用して全波整流が行われ、その結果、サイクルあたり6パルスピークの整流出力波形が得られる(図3・6B)。また、本装置の管電圧リップル100分率は13.4%となる。

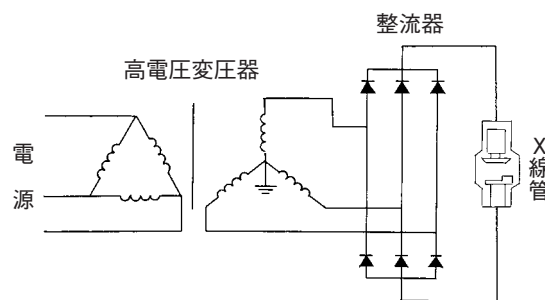


図3・7 3相6ピークX線高電圧装置回路図

3. 2. 3 3相12ピーク形X線高電圧装置

3相12ピークX線高電圧装置の回路図を図3・8に示す。高圧変圧器で一次側を Δ に、二次側を Δ とYに結線すると、二次側の Δ とY結線の位相差は $\pi/6$ の 30° となり、このことから二次側の電圧波形は12ピークとなる。

3. 2. 4 インバータ式X線高電圧装置

インバータ式X線高電圧装置には方形波形と共振形の2種類があり、図3・9は前者の装置の回路図を示している。

電源は単相または3相が用いられ、AC-DCコンバータを用いて整流により電圧を平滑にする。さらに平滑用コンデンサが使用され、整流後の脈動を平滑する。DC-DCコンバータでは主変圧器に供給する一次電圧の調整を行う回路で、チョッパから出力さ

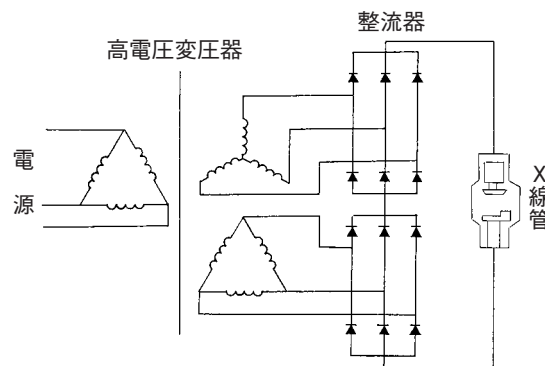


図3・8 3相12ピークX線高電圧装置の回路図

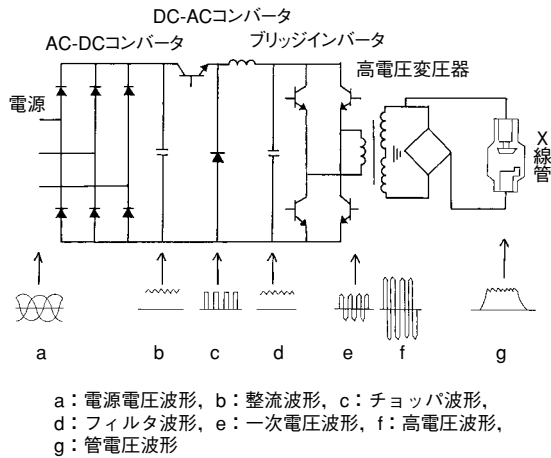


図3・9 インバータ式X線高電圧装置回路図

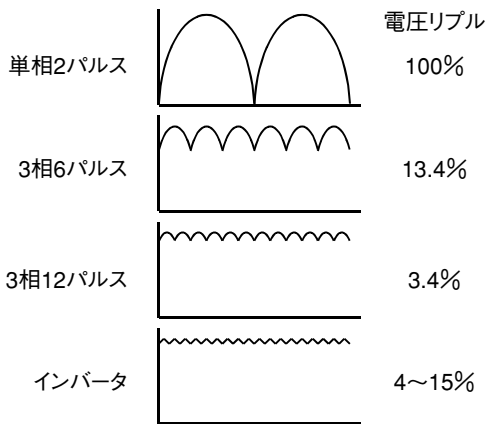


図3・10 各装置の電圧波形

れる方形波パルスフィルタで平均化し、直流一次電圧を得る。これを高電圧変圧器により高電圧にし、ブリッジ整流回路を経てX線管へ直流高電圧を供給する。

3.2.5 電圧脈動率

直流波形の電圧脈動率(percentage voltage ripple)はピーク電圧 V_{max} と最低電圧 V_{min} の差をピーク電圧で除して100を乗じたもので下式に示す。

$$\text{電圧リプル (\%)} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max}} \times 100 \dots\dots\dots (3 \cdot 4)$$

いろいろなX線装置からの電圧脈動率の比較を図3・10に示す。

単相1パルスでも2パルスでも理想的な電圧波形では電圧リプル100%である。しかし、高電圧ケーブルの容量効果により、ピーク電圧が平滑化されて電圧リプルは100%以下となる。3相6ピークの理想的な波形で電圧リプルは13.4%、3相12ピークで3.4%、インバータ装置では4~15%である。しかし実際は電圧波形がゆがみ、電圧脈動率は理想的な波形より大きくなっている。この電圧脈動率が小さい装置ほど、同じ管電圧でもX線質が硬くなる。

3.3 X線管

X線管は図3・11に示すように集束電極、フィラメント、陽極、陽極回転子、ガラス壁などで構成されている。

フィラメント(filament)が加熱され、陽極と陰極間に20~150[kV]に高電圧が負荷されると、フィラメントから放出された電子は陽極へ向かって加速されターゲットに衝突しX線が発生する。

管電流に関して撮影時は100~1000[mA]で、透視では1~5[mA]である。撮影は1000[ms]以下の短時間で行われ、撮影部位やその目的に応じて管電圧、管電流、撮影時間が選択される。

3.3.1 陰極

陰極(cathode)は電子の発生源で、タングステン(W)の巻き線であるフィラメントが集束電極のなかに取り付けられている。

フィラメントにはフィラメント回路から10[V]までの電圧で、7[A]までの電流が負荷される。フィラメントが熱せられると熱電子放出と呼ばれる過程で電子が放出される。フィラメントの寿命を長くし、電子放出率を高めるためにフィラメントにはタングステン(W)にレニウム(Re)を10%ほど加えられたものが使用されている。

集束電極(focussing cap)はフィラメントを取り巻きフィラメントから放出された電子を集束し、ターゲット面で焦点をつくる作用をしている。

集束電極に負荷される電圧はフィラメントに負荷される電圧と

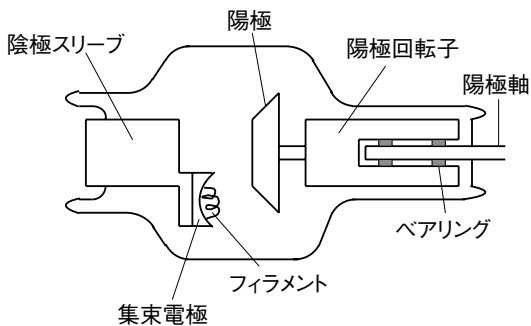


図3・11 X線管