

Title	X線管電圧および管電流波形の写真効果（第1報）管電圧・管電流波形, kVp値, および異常電圧
Author(s)	金森, 仁志
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1963, 23(3), p. 255-263
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/14747">https://hdl.handle.net/11094/14747</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# X線管電圧および管電流波形の写真効果

## (第1報) 管電圧・管電流波形, kVp 値, および異常電圧

島津製作所

金 森 仁 志

(昭和38年4月13日受付)

Radiographic Effects Due to the Waveforms of X-ray Tube Voltages and Currents  
Part 1 Waveforms of X-ray Tube Voltages and Currents,  
kV peak values, and Abnormal Voltages

By

Hitoshi Kanamori

Radiation Apparatus Division, Shimadzu Seisakusho Ltd.,  
Kyoto, Japan

Waveforms of tube-voltages, tube-currents and those at other parts of high-voltage circuit of single-phase rectified type apparatus are not such simple sinusoidal waveforms as shown in Fig. 2. Moreover, kVp values, one of the most important quantities to applied X-ray technique, have not been known accurately under largetule currents. These are also true at 3-phase rectified type apparatus. Waveforms are remarkably different from such simple ones as shown in Fig.9.

The waveforms at the two types were measured by anoscilloscope and their shapes are confirmed in detail by electric circuit theories. Peak kV were measured by a sphere-gap and theoretically confirmed. However, only outline will be stated in Part 1, since the purpose of this paper is to investigate radiographic effects due to waveforms and kVp values. Conclusions of Part 1 are as follows:

1. Waveforms of voltages and currents at the two apparatus are distorted from sinusoidal ones, and parasic oscillations sometimes appear. (Fig. 3~7, 10~14, and 16). These phenomenon are caused by satulating characteristics of X-ray tube current to tube voltage and L,C,R's in the electric circuits of apparatus.

2. If mA is small, tube voltage is smoothed by the electric capacities of the cables between high-voltage generator and X-ray tube (Fig. 3 and 10).

3. In cases of small kVp-large mA, with a single-phase type, the ratio of mA peak to mA average value is greater than in other cases(Fig. 18). Therefore, voltage-drop per mA, from the kVp at no load, are also greater in the same cases. It has long been questioned that the equi-mA curves open at the bottom in kVp-P.V. relations as

shown in Fig. 17. Now, the question is solved by the above illustration.

With a 3-phase type, the ratio of mA peak to average value is almost constant. Equi-mA curves, therefore, are almost parallel and with same space per mA (Fig.19). That causes the good radiographic effects of 3-phase types (Part 3).

4. Under small mA with a 3-phase type, kVp's go over the no load values calculated under such assumption that the waveform is sinusoidal (Fig. 9). This is caused by smoothing effects upon anode- and cathode-potentials.

5. In cases of small mA, abnormal voltages appear sometimes at closing times of an X-ray switch. Suppressing equipments against them have been installed in all apparatus, since this investigation was performed. The abnormal voltage makes break down of apparatus and poor radiographic effects.

## 1. 緒言

診断用X線装置のうちで、単相全波整流型および3相全波整流型X線装置におけるX線管電圧とX線管電流波形が、成書にあるような単純な正弦波とは著しく異り、ひずみや奇生振動が発生することは過去にも指摘されていた<sup>1)~6)</sup>。また、kVp値についても、とくにmAの多いときには精度が悪く、従来の平行・等間隔に引かれた管電圧図表が実測値と一致しないことや<sup>8)</sup>、kVpとmAsを同じにしてもmAを変えれば写真効果が異なること、等の問題点が残っていた。筆者は、管電圧・管電流波形のほかに、高電圧回路の各部の電圧・電流波形を測定した結果、ひずみ、奇生振動のほかに、異常電圧が発生すること、等の新しい事実を見出すとともに、これらの波形が電気回路理論、とくに、断続回路の解折法<sup>7)</sup>による計算結果と一致することを見出し、同時に、kVpの測定値もこの理論で説明することができた<sup>9)~12)</sup>。

一方、これらの現象が、発生X線とX線写真にどのような影響をおよぼすかと云うことは、装置の本来の目的上、きわめて重要なことであつて、これを究明するのが本論文の目的であるから、波形とkVp値については、第1報で概説するにとどめる。第1報は、第2報以後の結論を導き出すための準備である。

実験に用いたX線装置は、以下でとくにことわらない限り、つぎの組合わせである。すなわち、

単相装置として島津製「桂 150-Ⅲ型」(150 kVp, 500mA型)、3相装置として島津製「平安2型」(125kVp, 1000mA型)を用いて、これに、高電圧ケーブル8m(標準)を通して、島津製2mm焦点回転陽極X線管「サーグレットクス2型」を接続した。他の装置における測定結果も同じ傾向を示すので、以下にのべる事柄は一般性があると考えてよい。

高電圧の測定にはC-R並列分割方式の分圧器を使用した。プラン管オシロと組合わせたときに、誤差4%以内で直線性を保つ。kVp値の較正には、球ギャップを使用した。接地電位(管電流計回路)では管電流波形を正確に測定することができないので、オシロを高圧に浮かせてX線管陽極電位で測定した。

## 2. 単相装置における管電圧・管電流波形<sup>9)12)</sup>

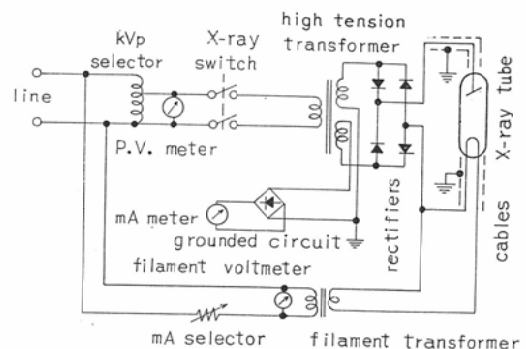


Fig. 1. Main Circuit of a Single-Phase Type X-ray Apparatus

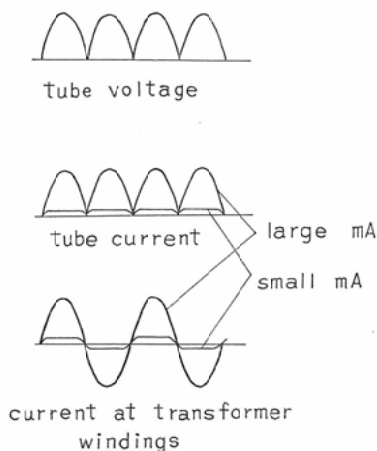


Fig. 2. Simple Waveforms at a Single-Phase Type

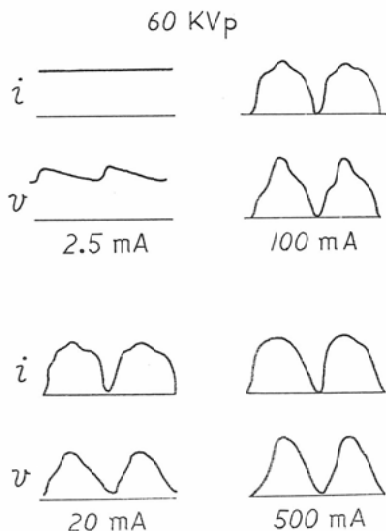


Fig. 3. Waveforms of Tube-Currents ( $i$ ) and Tube-Voltages ( $v$ )

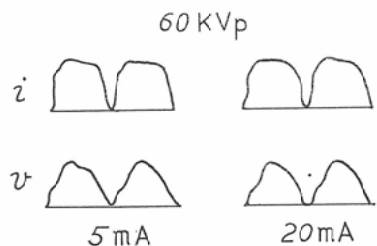


Fig. 4. Waveforms of Tube-Currents ( $i$ ) and Tube-Voltages ( $v$ ), without Cables

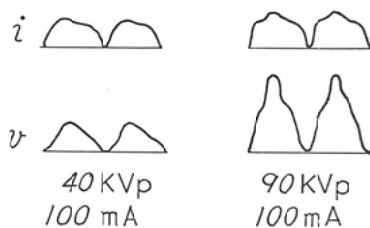


Fig. 5. Waveforms of Tube-Current ( $i$ ) and Tube-Voltage ( $v$ )

Fig. 1に単相装置の主要回路を示す。この装置における各部の電圧・電流波形はFig. 2のような単純な正弦波と考えられているが、実測結果とは著しく異つている。

### 2.1. ケーブルの静電容量による平滑化現象

Fig. 3は、管電圧を60kVp一定にしてmAを変えたときの管電圧と管電流の波形を示す。mAの多いときは、Fig. 2と同じように半サイクルごとにいったん0になるが、20mA以下では0まで下らない。これは、高電圧発生装置とX線管を接続するレントゲンケーブルの静電容量のために、定電圧装置と同じ効果がおこつて管電圧が平滑化されるためである。ケーブルのかわりに普通の導線で接続したときには、静電容量がないので平滑化されない。(Fig. 4)

### 2.2. 正弦波からのひずみ

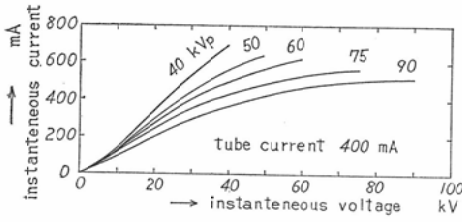
mAが多くて平滑化のおこらない範囲でも、波形は正弦波にならない。管電圧波形では先端がとがつて3角形に近くなり、管電流波形では上が平たくなる。これはX線管電流が管電圧に対して飽和するためで、Fig. 6のV-I特性を考慮して理論的に解析することができた。

### 2.3. 奇生振動

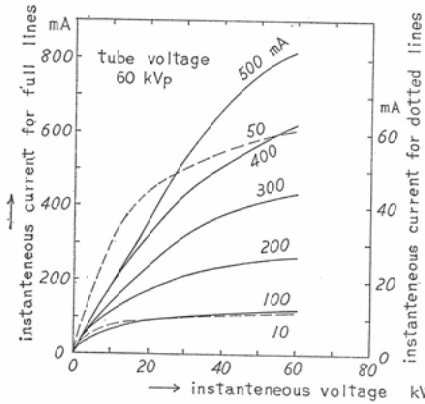
mAの少いときに、波形の立上りにおいて段ができるのは、奇生振動が発生しているためである。

### 2.4. X線管の電圧-電流特性(V-I特性)

ブラウン管オシロの縦軸と横軸に、それぞれ管電流と管電圧を印加するとX線管のV-I特性を得る。その測定結果をFig. 6に示す。同図(a)は管電流を400mA一定にしてkVpをかえたとき、同図(b)は60kVp一定にしてmAをかえ



(a) for various kVp's



(b) for various mA's

Fig. 6. Voltage-Current (V-I) Characteristics of an X-ray Tube at a Single-Phase Type

たときの特性を示す。図によれば、kVp が低くて mA が大きくなれば、V-I 特性は直線に近くなり、これ以外のところでは飽和特性を示している。単相装置で kVp と mAs を等しくしても、mA が変れば写真効果が著しく異なる現象は、とくに V-I 特性が直線に近づく場合に顕著である。

Fig. 5 は、管電流を 100mA 一定にして kVp をかえたときの波形であるが、Fig. 3 と比較して、60kVp、100mA からそれぞれ kVp を減少させたときと mA を増加させたときの波形は類似していることがわかる。この逆の場合も同様である。管電圧と管電流の波形は X 線管の V-I 特性と装置の回路定数で定ることが理論的に導れたが、1つの条件から kVp を増加させても mA を減少させても、V-I 特性は同じように飽和に近づくので、波形も類似する。

2.5. 変圧器中性点 (mA計回路)の電流波形<sup>12)13)</sup>

変圧器中性点における電流波形と X線管電流の波形を Fig. 7 で比較するが、mA の少いときには著しく異なる。とくに中性点電流波形では奇生振動が顕著に現れる。この振動は、ケーブル、変圧

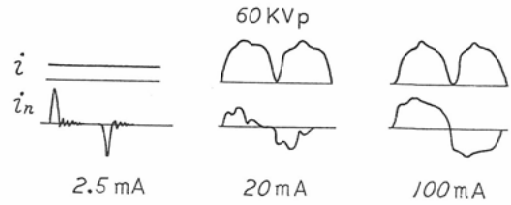


Fig. 7. Waveforms of Tube-Currents ( $i$ ) and Currents at Secondary Windings of a High-Voltage Transformer ( $i_n$ )

器巻線、その他装置内にあるインダクタンス L と 静電容量 C によつて発生する自由振動である。さらに mA が少くなるとケーブルに充電するために大きな電流が流れるのがみられる。この電荷で管電圧が平滑化される。なお、Fig. 7 で、下の図の縦軸は上の図よりも縮小されているが、100mA では両者が同じ波形である。

中性点電流波形を全波整流して mA 計に流して、管電流平均値 (mA) を制御盤上で読んでいるが、mA 補償器があるので mA 計の指示 (平均値) は管電流平均値に近い値を示す。しかし、mA 計回路あるいは、これを整流する前の中性点の電流波形を測定して管電流波形とすることは、大きな誤りであるから注意を要する。

3. 3相装置における管電圧・管電流波形<sup>11)12)</sup>

Fig. 8 に 3 相装置の主要回路を示す。この装置における波形は Fig. 9 のような単純な正弦波と考えられているが、実測結果は著しく異っている。3 相装置においては、単相装置と同じ現象が発生する上に、3 相装置特有の現象が加つてさらに複雑な結果を生じる。

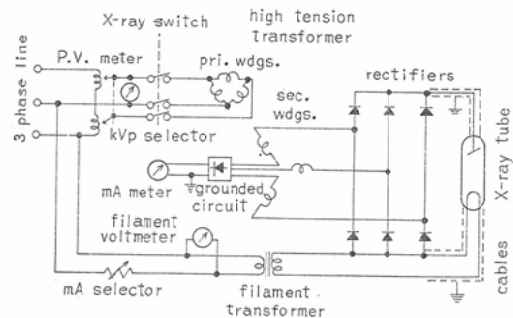


Fig. 8. Main Circuit of a 3-Phase Type X-ray Apparatus

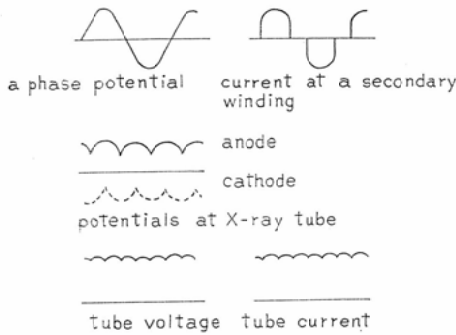


Fig. 9. Simple Waveforms at a 3-Phase Type

3.1. ケーブルの静電容量による平滑化現象

Fig.10に、60 kVp 一定にして mA をかえたときの管電圧、管電流の波形を示す。ケーブルを用いずに導線で接続して静電容量を0にしたときの波形 (Fig.11) と比較すると、10mA 以下では

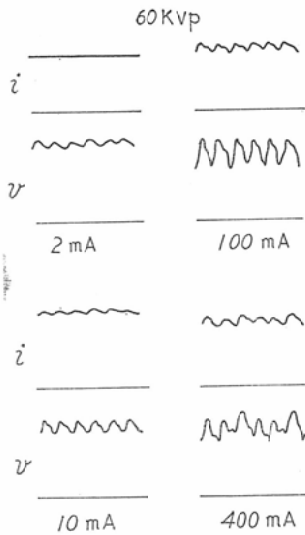


Fig. 10. Waveforms of Tube-Currents (*i*) and Tube-Voltages (*v*)

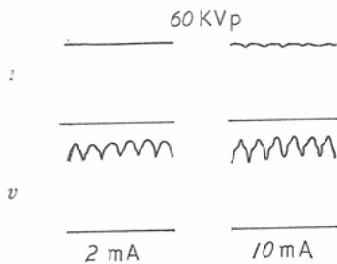


Fig. 11. Waveforms of Tube-Currents (*i*) and Tube-Voltages (*v*)

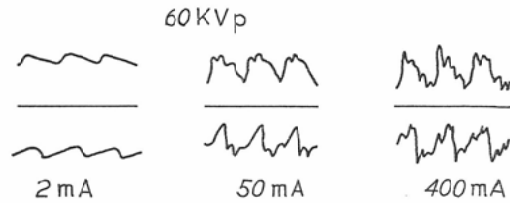


Fig. 12. Waveforms of Anode- and Cathode Potentials of an X-ray Tube

ケーブルによる平滑化現象があることがわかる。

3.2. 正弦波からのひずみと寄生振動

mA が多くて平滑化現象のおこらない範囲では、管電圧波形がとがって、寄生振動もあらわれる。この寄生振動は、Fig. 12に示すように、mA の多いときの管球陽極と陰極の電位波形において顕著である。しかし、陽極と陰極で同位相であるから、管電圧波形では互に打消し合つて少ししか現れない。3相の回路定数が等しければ完全に打消される筈であるが、実際の装置では等しくないため少し残る。mA が多くなると各相の電圧降下に差があらわれて管電圧波形においてピークが揃わなくなるのも、回路定数が等しくないためである。

なお、mA が多いときの寄生振動は単相装置で発生せず、3相装置に特有な現象であつて古くから問題になつてきたが<sup>3)-5)</sup>、筆者はこれを理論的に説明することができた<sup>12)14)15)</sup>。それによれば、3相装置では、陽極側と陰極側の起電力と回路状態が上下非対称であるからこの振動が発生するのであつて、単相装置では上下対称であるから発生しない。

3.3. X線管の V-I 特性

3相装置では脈動が少ないので、Fig.13のように V-I 特性の先端だけで動作している。このことは、4.2.の管電圧図表に関係する。

3.4. 変圧器中性点 (mA 計回路) の電流波形<sup>12)14)15)</sup>

変圧器中性点における各相の電流波形を Fig. 14に示した。mA の少いときには、単相のときと同じ振動が現れ、ケーブルの充電電流もみられる。mA が多くなると振動は少くなる。また、mA が多いときには、陽極または陰極側で、相電

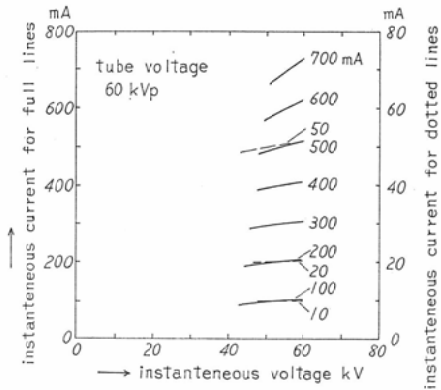


Fig. 13. Voltage-Current (V-I) Characteristics of an X-ray Tube at a 3-Phase Type

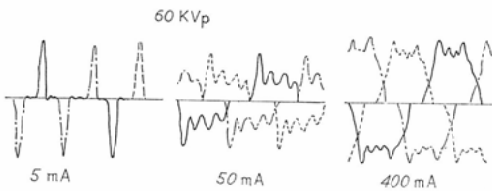


Fig. 14. Waveforms of Currents at Secondary Windings of High-voltage Transformers—Phase Currents

流が徐々につぎの相にうつりかわる。Fig. 9ではこれが瞬時にうつりかわると考えている。これは整流器の転流期間であつて単相装置では見られなかつた現象である。mAが多くなるとこの期間が長くなって、3相装置に特有な奇生振動が大きくなる。

3.5. 6相(2重3相)装置と波形<sup>16)</sup>

従来から用いられてきた3相装置の整流方式(Fig. 8)においては、Fig. 12に示すように、陽極、陰極の電位のピークの時期が一致しないのでX線管の電圧定格をフルに利用することができない。管容器に対する両電極の耐圧が、管球定格の半分に設計されているためである。たとえば、150 kVpの定格の管球は125 kVpまでしか使用できない。この欠点をなくするために、Fig. 15のような6相整流方式が採用されるようになった。これは、従来の3相整流方式を、陽極側と陰極側にそれぞれ1個ずつ配置させて直流側を直列接続した方式であるから、陽極と陰極の電位が上下で同

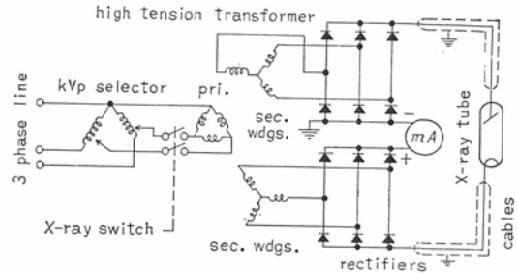


Fig. 15. Main Circuit of a Double-3-Phase Type Apparatus

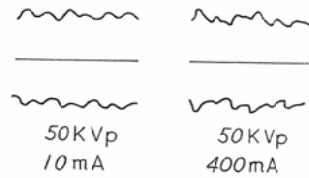


Fig. 16. Waveforms of Anode- and Cathode-Potentials of an X-ray Tube at a Double-3-Phase Type Apparatus

形となつてピークも一致する筈である。島津製平安Ⅲ型(3相 150 kVp, 1000mA型)はこの方式を採用しているが、この装置における陽極と陰極電位はFig. 16のように上下対称になることが確かめられた。しかも、管電圧波形は、従来の3相装置と同じく1サイクルに6回の脈動があるので、X線の見地からは3相装置としてあつたことがわかる。

4. kVp 値

1次電圧(P.V.)と管電流(mA)からkVp値を求めるのに管電圧図表が用いられている。kVp, mAを直読する装置でも、この図表をもとにして制御回路が作られているので、この図表について考察する。

4.1. 単相装置における管電圧図表<sup>9)12)</sup>

実験に用いた装置でkVp値を測定して管電圧図表を作成するとFig. 17のようになった。従来の装置においては、無負荷時の値からの電圧降下はmA値に比例すると思われていたので、平行で等間隔な線が引かれていたが、実測するとFig. 17のように下で開く傾向があるので長い間疑問とされていた<sup>9)</sup>。筆者は、この現象を、X線管のV-I特性を考慮して理論的に説明したが、その物理

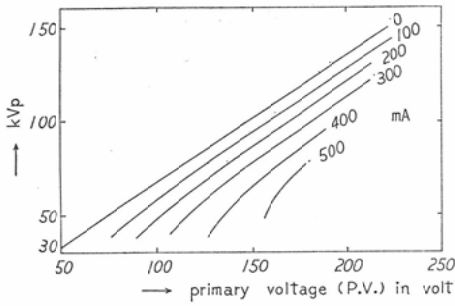


Fig. 17. kVp-P.V. Relations at a Single-Phase Type X-ray Apparatus

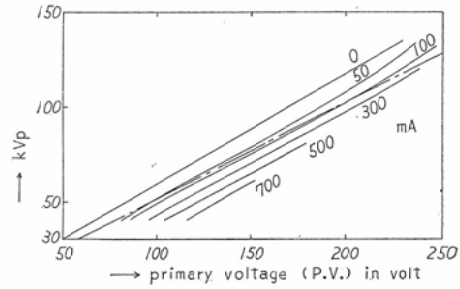


Fig. 19. kVp-P.V. Relations at a 3-Phase Type X-ray Apparatus

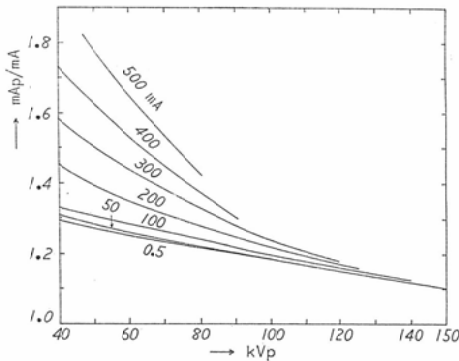


Fig. 18. Ratio of mA Peak Values to Mean Values

的な意味はつぎのようである。管電圧のピークにおける電圧降下は mAp 値にほぼ比例するが、従来は管電流波形が正弦波であると考えていたので mA (平均値) が一定であれば電圧降下も一定であると考えられていた。しかし、実際には平均値が一定であつても V-I 特性が飽和していれば波形が平たくなるのでピーク値は小さく、直線に近くなれば波形がとがるのでピーク値が高くなる。ピーク値と平均値の比は、本実験では、Fig. 18 のようであつた。これによれば、kVp が低くて mA が大きいときにはとくに mAp 値が大きくなるので、電圧降下が大きくなるのがわかる。そこで管電圧図表の下の方が開くようになる。

4.2. 3相装置における管電圧図表<sup>11)12)</sup>

3相装置における管電圧図表は Fig. 19 のようになった。従来は、Fig. 9 のような正弦波形と考えられていたので無負荷時の kVp は

$$\sqrt{3} n \times (\text{1次電圧のピーク値})$$

と考えられていた。ただし n は主変圧器 1 相あた

りの巻数比をあらわす。図の破線はこの計算値を示す。負荷時の線は、この線に平行で等間隔にひかれていた。300mA 以上の実測値はだいたいこのような傾向を示している。これは、管電流波形の変動範囲が小さいので、V-I 特性が直線に近くても飽和していても、mA ピーク値と平均値との比がほぼ一定であるからである (Fig. 13)。単相装置のように下で開かないことは、3相装置における写真効果が単相装置よりもすぐれていることの一つの大きな原因である。この点については続報でのべる。つぎに、100 mA より少いときに破線の kVp よりも高くなるのは X 線の陽極と陰極の電位がそれぞれ平滑化されるためであつて、完全に平滑になつておれば

$$2n \times (\text{1次電圧のピーク値})$$

になる筈である。0 mA の実測値はこれと一致する。mA が増加するに従つて完全平滑ではなくなるので、線の傾きは小さくなつて破線に近づく。単相および 6 相装置では、陽極、陰極の電位のピークの時期が一致しているので、このような現象はおこらない。

5. 閉路時の異常電圧<sup>10)12)13)14)15)17)</sup>

単相および 3 相装置において、とくに mA が小さいときには、主変圧器 1 次側の X 線閉閉器を閉路するときに異常電圧が発生して、予定した kVp の 1.8 倍にも達することがある。従来装置においては高電圧に対する余裕が充分大きく設計されていたので全然問題にされていなかったが、高圧撮影装置ができて、装置を小型にするようになってから、これが問題にされるようになった。また、この異常電圧は mA が多くなれば発生しな



くなるが、従来は低圧大電流撮影がおこなわれていたので問題にされなかつたと考えることもできる。高圧小電流撮影では当然問題となる事柄である。筆者は実験的ならびに理論的に検討した結果この異常電圧の性質をあきらかにして、防止対策を確立せしめた。これは、装置の絶縁破壊をひきおこすだけでなく、続報にのべるように写真効果の点でも有害である。

### 5.1. 単相装置における異常電圧

Fig. 20に閉路位相をかえたときの管電圧波形を示す。図によれば、電圧0付近で閉路すれば異常電圧が発生しないが、ピーク付近で閉路すれば最大になることがわかる。Fig. 21は管電圧を一定に

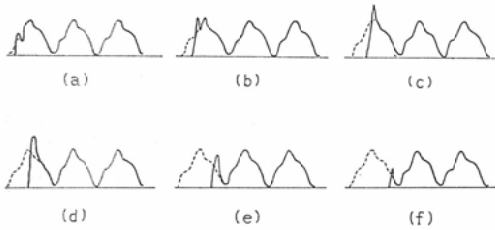


Fig. 20. Abnormal Voltages to Various Closed Phase Angles, 60 kVp, 50 mA

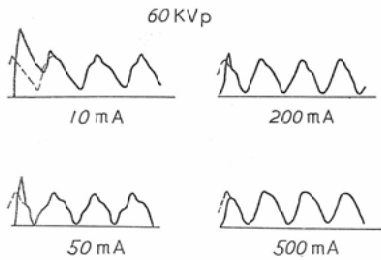


Fig. 21. Abnormal Voltages at Closed Times to Various Tube Currents

してピーク付近で閉路したときに、mA が少いほど異常電圧が大きいことを示す図である。mA がある値より大きければ発生しなくなる。理論的な考察によれば、この異常電圧は、2.3, 2.5でのべた寄生振動と同じ振動で、V-I 特性における先端の傾斜がゆるいほど発生しやすいことがわかった。また、この傾斜がある限界値以上になれば発生しない。

この異常電圧は、閉路位相調整装置をつけて 0

付近で閉路すれば防止される。

### 5.2. 3相装置における異常電圧

3相置においても単相のときと同じ性質の異常電圧が発生するが、3相の電圧をそれぞれ0付近で閉路するか、1相を0で閉路して、他の2相を90°おくらせて閉路すれば、その発生を防止することができる。

## 6. 結 言

単相および3相診断用X線装置に関して、管電圧、管電流等の、高電圧回路における波形、および kVp 値を測定して、これを理論的に解明した結果、つぎの結論を得た。

1. 上述の各波形は、成書にあるような単純な正弦波波形ではなく、X線管の電圧-電流特性 (V-I 特性) と装置内の静電容量、インダクタンスのために、波形がひずみ、寄生振動が発生する。

2. mA の小さいときには、ケーブルの静電容量のために管電圧が平滑化されて、定電圧波形に近づく。

3. 単相装置においては、kVp が低くて mA が大きいときには、mA ピーク値が mA (平均) 値とくらべてとくに大きくなるので、電圧降下が大きくなる。このために、管電圧図表において、等 mA 曲線が下の方で開く。3相装置では、このような現象がない。

4. 3相装置において mA の少いときには、陽極と陰極の電位がそれぞれ平滑化されるために、kVp 値が正弦波の無負荷時の値よりも高くなる。6相装置ではこのような現象がない。

5. mA の少いときには、X線開閉器の閉路時に異常電圧が発生するので、その防止装置をつけなければならない。

## 文 献

- 1) 福田：日本レントゲン学会誌，8，1 (1930)。
- 2) 中堀，佐野：鳥津評論，6，216 (1950)。
- 3) H. Chantraine: Fortschr. Rönt. 53, 585 (1936)。
- 4) W. Daumann: Fortschr. Rönt. 56, 336 (1937)。
- 5) 中堀：鳥津評論，4，47 (1942)，第14図，15図。
- 6) M. Williams: Radiology 37, 44 (1941)。
- 7) S. Hayashi (林重憲) Periodically Interrupted Electric Circuits, 電気書院 (1961)。
- 8) たとえば，中堀：鳥津評論，4，3号，1 (1943)。
- 9) 金森，高尾：昭37電気関係学会関西支部連

合大会予稿7—9. —10) 金森：昭37電気関係学会  
会関西支部連合大会予稿7—12. —11) 金森：昭  
38電気関係学会連合大会予稿 743. —12) 金森：  
電気学会雑誌投稿予定. —13) 金森：島津評論，  
16, 49 (1959). —14) 金森：島津評論，16, 173

(1959). —15) 金森：島津評論，18, 39 (1961).  
—16) 金森：昭37電気関係学会連合大会予稿，  
469. —17) 佐野，岡西，則包：島津評論，18, 11  
(1961).