



3相12パルス整流形X線装置の高電圧波形解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 松本, 政雄, 金森, 仁志 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00008021

3相12パルス整流形X線装置の高電圧波形解析*

Analysis of High-Voltage Waveforms in 3-Phase 12-Pulse Type X-ray Units

松本政雄**，金森仁志***
Masao MATSUMOTO** Hitoshi KANAMORI ***

(昭和57年4月15日受理)

あ ら ま し

本研究は、3相12パルス整流形X線装置の軽負荷時の高電圧波形と電源投入時の異常電圧の防止方法について、理論解析を行ったものである。まず、高電圧発生回路のX線管の管電圧及び二次巻線電流の実測波形から、高電圧発生回路の回路状態の変化を考え、それぞれの等価回路を作成する。次に、これらの等価回路に第3類断続回路解析法を適用して、X線管の管電圧及び二次巻線電流の理論波形を求め、実測波形と比較検討した。その結果は、だいたい一致した。また、電源投入時に発生する異常電圧を防止する方法として、二段投入法を考え、これを理論的に解析した結果、異常電圧を防止するのに有効であることが明らかになった。

1. ま え が き

3相12パルス整流形X線装置のX線管の管電圧及び二次巻線電流の波形は、単純な正弦波整流波形でなく、寄生振動のために複雑になる。これらの波形は、発生X線の特性に影響を及ぼすほかに、装置の絶縁特性を知る上で重要となる。

このようなX線装置の理論解析は、すでに単相及び3相6パルス整流形X線装置については、金森が解析を行った。1~5) 今回は、現在、もっともよく使用されている3相12パルス整流形X線装置について解析を行ったので報告する。6,7)

図1に3相12パルス整流形X線装置の高電圧発生回路を示す。この回路は、3相変圧器の一次側

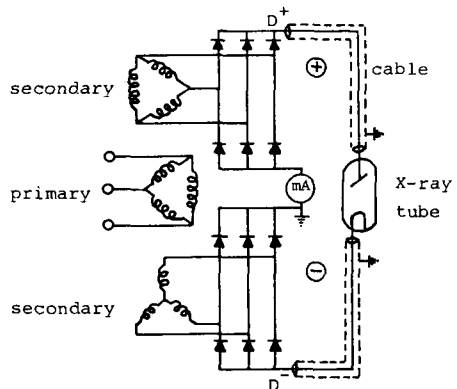


図1 高電圧発生回路

* 昭和56年電気関係学会関西支部連合大会 (56. 10. 22)

及び昭和57年電気学会全国大会 (57. 4. 2) で発表

** 電気工学科 (Department of Electrical Engineering)

*** 京都工芸繊維大学 電気工学科 (Department of Electrical Engineering, Kyoto Technical University)

にΔ巻線を，二次側にΔ及びY巻線を用い，12個の整流器で二次電圧を全波整流して，X線管に高圧直流電圧を加え，X線を発生させる。この高圧直流電圧は，Δ側とY側では，位相が30度ずれているので，1周期に12個の脈動を含んだものとなる。この高圧直流電圧のリップルはわずか5%である。さらに，軽負荷時には，高電圧ケーブルの静電容量のために一層平滑化され，直流電圧に近くなる。

この高電圧発生回路に電源を投入して，軽負荷時のX線管の陽極及び陰極の管電圧とΔ及びY巻線の二次巻線電流を測定した。以下，管電圧波形と二次巻線電流波形について述べる。

2. 実測波形とその考察

図2に，軽負荷時の管電圧及び二次巻線電流の実測波形を示す。それぞれの図で，縦軸は電圧及び電流を，横軸は位相 ($\omega t=2\pi 60t$) を示している。同図(a)で，実線は実測波形を，点線は電源電圧を示している。管電圧は高電圧ケーブルの静電容量へ充電しながら上昇し，ピークに達した後，整流回路が切り離され，高電圧ケーブルの充電電圧がX線管を通して放電される。この放電電圧が電源電圧と一致したところで，整流回路がつながり，二次巻線電流が流れ，充電が再開される。このように高電圧ケーブルの静電容量への充電とX線管を通しての放電を繰り返しながら，定常状態に落ち着く。この管電圧の最初のピーク電圧を異常電圧といい，電源電圧の約1.5倍の電圧となっている。この異常電圧を防止することは，装置の絶縁特性の面から重要となる。

また，同図(b)の二次巻線電流は，管電圧の変化に対応して，最初に大きな突入電流が流れ，次に整流回路が切り離されて電流が流れなくなり，整流回路がつながると，再び流れ始める。

このような高電圧波形を解析するために，まず高電圧発生回路の回路状態の変化を考え，それぞれの等価回路を作成する。

3. 高電圧発生回路の等価回路

図1の高電圧発生回路の回路状態を考え，その回路状態に対応する等価回路を図3に示す。電源を投入すると，まず，3相電源のうちの2相だけが導通し，同図(a)で示す基本回路状態となる。次に片側の高電圧ケーブルの静電容量に先に充電が完了して，片側の整流回路が切り離され，同図(b)で示す片側遮断回路状態となる。さらに，もう一方の高電圧ケーブルの静電容量に充電が完了すると，両側の整流回路が切り離されて，X線管を通して充電電圧が放電され，同図(c)に示す放電回路状態となる。これら3つの回路状態の等価回路に第3類断続回路解析法

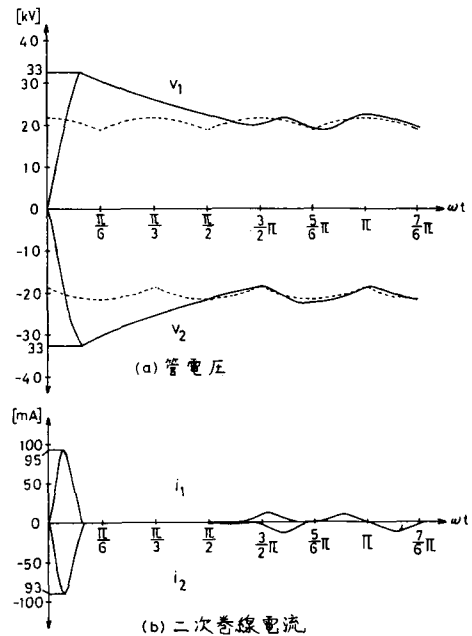
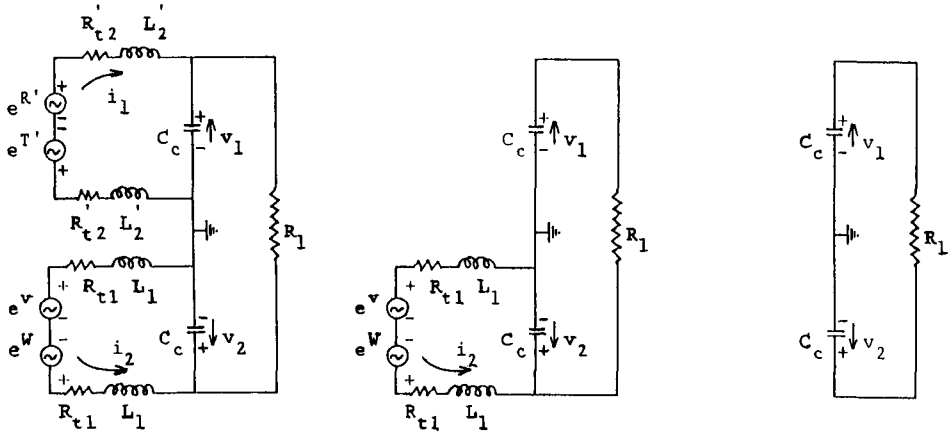


図2 軽負荷時の実測波形



(a)基本回路状態 (b)片側遮断回路状態 (c)放電回路状態

図3 高電圧発生回路の等価回路

を適用して、解析を行った。

3.1 基本回路状態の解

図3(a)で、上側がΔ巻線に、下側がY巻線に対応している。Δ側では、 $e^{R'}$ 、 $e^{T'}$ は二次側に換算した電源電圧を、 R'_{t2} 、 L'_2 は二次巻線のインピーダンスと二次側に換算した一次巻線のインピーダンスとの和を、 i_1 は二次巻線電流を、 C_c は高電圧ケーブルの静電容量を、 v_1 はその端子電圧を、 R_1 はX線管の等価抵抗を示している。Y側についても同様である。この基本回路状態の二次巻線電流 i_1 、 i_2 と高電圧ケーブルの静電容量の端子電圧 v_1 、 v_2 を未知数として、基準微分方程式を作ると次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} 2Z'_2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2Z_1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & Y_3 & -Y_4 \\ -1 & 0 & -Y_4 & Y_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{R'} - e^{T'} \\ e^W - e^V \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4 \cdot 1)$$

ただし

$$Z_1 = L_1 D + R_{t1} \quad , \quad e^{R'} = E \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_1)$$

$$Z'_2 = L'_2 D + R'_{t2} = Z_1 \quad , \quad e^{T'} = E \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_1)$$

$$Y_3 = C_c D + \frac{1}{R_1} \quad , \quad e^W = E \sin(\omega t - \frac{\pi}{2} + \theta_1)$$

$$Y_4 = \frac{1}{R_1}, D = d/dt \quad , \quad e^V = E \sin(\omega t + \frac{\pi}{6} + \theta_1)$$

ここで、 θ_1 は基本回路状態に移る時の位相角をS'相の電源電圧を基準に表わしたものである。この基準微分方程式に第3類断続回路解析法を適用して求めた解を次式に示す。

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \chi_1 & \chi_2 & \chi_3 & \chi_4 \\ \chi_5 & \chi_6 & \chi_7 & \chi_8 \\ \chi_9 & \chi_{10} & \chi_{11} & \chi_{12} \\ \chi_{13} & \chi_{14} & \chi_{15} & \chi_{16} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1^{-0} \\ i_2^{-0} \\ v_1^{-0} \\ v_2^{-0} \end{pmatrix} \quad (4 \cdot 2)$$

ここで、 $\phi_1 \sim \phi_4$ は初期値に依存しない項で、 $\chi_1 \sim \chi_{16}$ は第 1 種初期値 $i_1^{-0} \sim v_2^{-0}$ に依存する項である。その中味は、複雑であるので、ここでは省略する。

3.2 片側遮断回路状態の解

図 3(b)の片側遮断回路状態の基準微分方程式は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} 2Z_1 & 0 & 1 \\ 0 & Y_3 - Y_4 \\ -1 & -Y_4 & Y_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^w - e^v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4 \cdot 3)$$

ただし、 Z_1 、 Y_3 、 Y_4 、 D は (4.1) 式と同じである。この (4.3) 式の解は次式ようになった。

$$\begin{pmatrix} i_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \chi_1 & \chi_2 & \chi_3 \\ \chi_4 & \chi_5 & \chi_6 \\ \chi_7 & \chi_8 & \chi_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_2^{-0} \\ v_1^{-0} \\ v_2^{-0} \end{pmatrix} \quad (4 \cdot 4)$$

3.3 放電回路状態の解

図 3(c)の放電回路状態の基準微分方程式は次式のようにになる。

$$\begin{pmatrix} Y_3 & -Y_4 \\ -Y_4 & Y_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4 \cdot 5)$$

ただし、 Y_3 、 Y_4 は (4.1) 式と同じである。この (4.5) 式の解は次式のようになった。

$$v_1 = -v_2 = \frac{1}{2}(v_1^{-0} - v_2^{-0})e^{-\frac{2}{C_c R_1}t} \quad (4 \cdot 6)$$

この (4.6) 式をみると、放電回路状態に移した時に、 v_1 、 v_2 の電圧の大きさが等しくなってしまう、実測と一致しなくなる。そこで、(4.6) 式を次式のように修正して考えた。

$$v_1 = v_1^0 e^{-\frac{2}{C_c R_1} t} \quad , \quad v_2 = v_2^0 e^{-\frac{2}{C_c R_1} t} \quad (4 \cdot 7)$$

このようにして求めた解(4・2), (4・4)及び(4・7)式を使って, 管電圧及び二次巻線電流の理論波形を計算すると, 次のような結果になった。

4. 理論波形とその考察

図4が求めた理論波形である。ただし, この時に使用した定数の値を表1に示す。

表1. 計算に使用した定数の値

電源電圧	$E(\text{kV})$	44.9
角周波数	$\omega(\text{S}^{-1})$	$2\pi 60$
等価直列抵抗	$R_n = R'_n(\text{k}\Omega)$	25.7
等価直列インダクタンス	$L_1 = L'_2(\text{H})$	71.6
高電圧ケーブルの静電容量	$C_c(\text{pF})$	51.0
X線管の等価抵抗	$R_1(\text{M}\Omega)$	28.5

図4を考察すると, 管電圧は基本回路状態2で, 上昇し, ピーク値に達する。この時, 陽極側と陰極側とは, 位相差があるので, ピーク値への到達時間がずれ, 片側遮断回路状態1がわずかではあるが存在し, その後すぐに放電回路状態0に転移する。次に, v_2 の放電電圧が電源電圧と一致したところで, 片側遮断回路状態1に戻り, v_1 の放電電圧が電源電圧と一致したところで, 基本回路状態2に戻る。その後, 図のように, 片側遮断回路状態1と基本回路状態2を交互に繰り返しながら, 定常状態に落ち着く。また, 二次巻線電流の方も, 管電圧の変化に対応して変化していることがよくわかる。この理論波形と実測波形とを次に比較検討する。

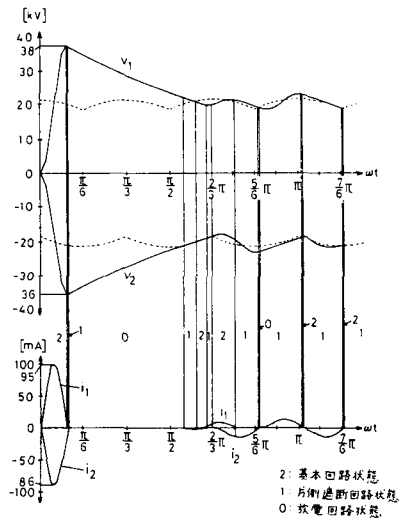
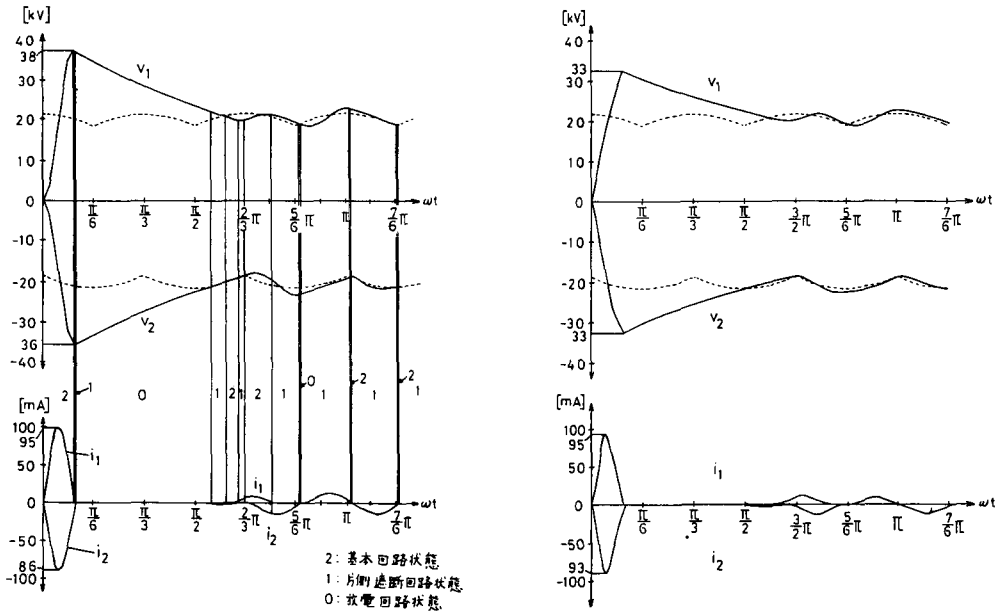


図4 軽負荷時の理論波形

5. 理論波形と実測波形との比較

理論波形と実測波形との比較を図5に示す。同図(a)に理論波形を, (b)に実測波形を示してある。全体の波形はだいたい一致している。異常電圧は, 理論波形の方が少し大きくなっている。また, 放電電圧が電源電圧と一致する位相が理論波形の方がわずかに遅れているが, これは異常電圧が大きくなったために発生したものと考えられる。この異常電圧の誤差は, 理論波形を計算する時に使用した定数を実測波形から導出したために発生した誤差によるものと考えられる。また二次巻線電流の波形もだいたい一致していることがわかる。この場合の誤差も, 管電圧の場合と同様の原因によるものである。



(a) 理論波形

(b) 実測波形

図5 理論波形と実測波形との比較 (軽負荷時)

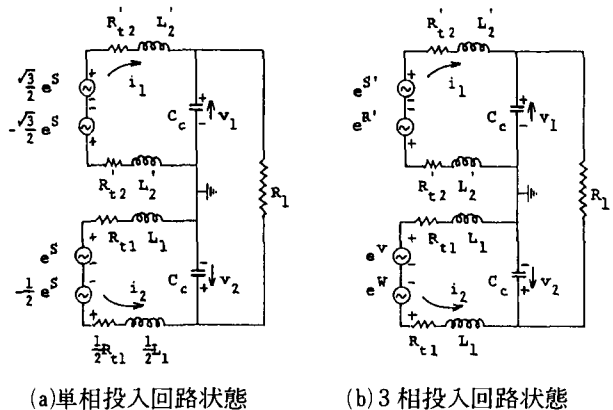
6. 電源投入時の異常電圧防止法 (二段投入法)

図1の高電圧発生回路に電源を投入した時に発生する異常電圧は、絶縁破壊を引き起こすだけでなく、発生X線の線質を硬くするので、写真効果の点でも有害であるから、これを防止する必要がある。その方法として、二段投入法を考える。

二段投入法とは、電源投入時に、まず単相で投入して、単相電圧が最大となる $\frac{\pi}{2}$ の位相で、3相を投入するという方法である。この二段投入法の等価回路を図6に示す。

図6(a)は単相投入時の回路状態を示し、 Δ 側の電源電圧は $\sqrt{3}$ 倍に、

Y側の電源電圧は $\frac{3}{2}$ 倍になって現われ、回路定数は、3相投入回路状態の場合と比べると、 Δ 側では変わらず、Y側では、 $\frac{3}{4}$ 倍となる。同図(b)は $\frac{\pi}{2}$ の位相で3相を投入した時の回路状態、これは、図3(a)で示した基本回路状態と同じになる。これらの等価回路に第3類断続回路解析法を適用して求めた理論波形を図7に示す。図7の上側は管電圧を、下側は二次巻線電流を示している。管電圧は電源電圧の上昇に沿って振動しながら上昇し、 $\frac{\pi}{2}$ の位相で3相が投入された



(a) 単相投入回路状態

(b) 3相投入回路状態

図6 二段投入法の等価回路

ところで、単相と3相の電圧ギャップがあるために、少し大きく振動した後、定常状態に落ち着く。この時、発生する異常電圧は、3相投入時に現われるが、その大きさは電源電圧の約1.1倍と小さくなることがわかった。また、二次巻線電流の方も、管電圧の振動状態に対応して振動しているが、電源投入時の突入電流はあまり大きくならない。この結果から、電源投入時の異常電圧を防止する方法として、二段投入法が有効であることがわかった。

7. む す び

3相12パルス整流形X線装置の軽負荷時の高電圧波形を第3類断続回路解析法で解析し、実測波形と比較して、次の結論を出した。

(1)高電圧発生回路を図3のような集中定数回路で置き替え、X線管を等価抵抗で近似して解析することができた。

(2)解析の結果、電源投入時から定常状態に落ち着くまでの回路状態の転移と、管電圧及び二次巻線電流の理論波形を求めることができた。

(3)この理論波形と実測波形とを比較した結果、実測波形を十分に説明することができ、波形もだいたい一致した。

(4)電源投入時に発生する異常電圧を防止する方法として、二段投入法を考え、この理論波形を計算した結果、有効であることがわかった。

今後は、二段投入法の理論結果を実験で確かめ、さらに、重負荷時の高電圧波形についても解析する予定である。

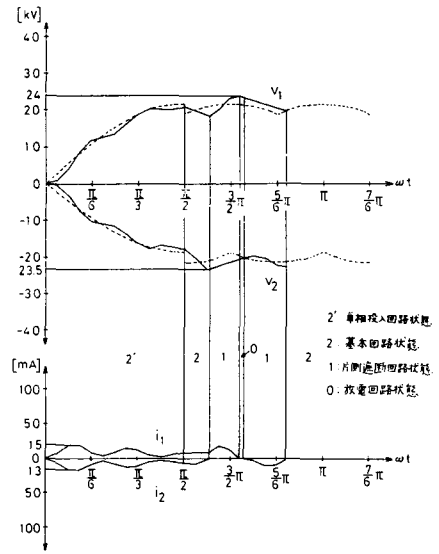


図7 二段投入法の理論波形

参 考 文 献

- (1)金森：電気学会雑誌，85—1，916 (1965)
- (2)H.Kanamori :Jour. Franklin Inst., 279,3,p147—159(1965)
- (3)H.Kanamori :Jour. Franklin Inst., 279,5,p347—359(1965)
- (4)H.Kanamori :Jour. Franklin Inst., 279,4,p246—253(1965)
- (5)金森：日本医学放射線学会雑誌，23，3。(1965)
- (6)松本，金森：昭和56年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 G3—62
- (7)松本，金森：昭和57年電気学会全国大会講演論文集 6，507