

リアクトル回路遮断電流振動現象と過電圧

吉 永 淳*・池 邑 繁 樹*・亀 井 健 次**

The arc parameters of circuit breakers characterizing the shunt reactor switching current and voltage transients

Kiyoshi Yoshinaga, Shigeki Ikemura, Kenji Kamei

The reactor switching transient generated by the interaction between the arc and the surrounding circuit may often cause undesired effects on the reactor and the equipment. This paper describes the arc parameters and circuit parameters characterizing shunt reactor switching transient. The instability conditions created by the abrupt change of the arc conductance are studied. The simulations show the conditions are effective for estimating the arc current and voltage transient. The suppression peak over-voltages are simulated in conjunction with the arc parameters of the modified Mayr model.

1. まえがき

変圧器の励磁回路、分路リアクトル回路などのような小電流遮断においては、遮断電流は小さいが、遮断の過程で電流拡大現象がみられる。この現象はアークの負特性と LC 回路の相互作用によるものとされている。¹⁾ この電流振動拡大現象が電流遮断時の電流勾配に影響し、遮断後のリアクトルの異常電圧発生の要因になる。したがってこのような遅れ小電流遮断では、回路条件、遮断器条件と過電圧評価が重要となる。ここでは遮断器アークの特性式として、Mayr モデル、および Modified Mayr モデル²⁾ を使用し、アークパラメータが回路との相互作用でどのように電流拡大現象および遮断後の過電圧に影響を与えるかを検討した。また電流振動現象について実験データとの比較を行った。

2. 電流振動現象とアークパラメータ

2. 1 アークパラメータの電流振動への影響

リアクトル電流遮断における開閉過渡現象は遮断器極間やリアクトルの並列キャパシタンス、および遮断器とリアクトル接続線路あるいはケーブルなどの回路定数の影響を受ける。電力系統では 3 相回路開閉であり、相間影響も生じてくるが、ここでは先ず直接接地 Y 回路の単相等価回路 Fig1.(a)をベースに基本検討を行う。

アークパラメータが電流振動現象に与える影響の概況を把握するため、リアクトル遮断回路を Fig.1(b)のように簡易化した回路で基本的な検討を行った。³⁾

* 電気電子工学科 ** 三菱電機株式会社

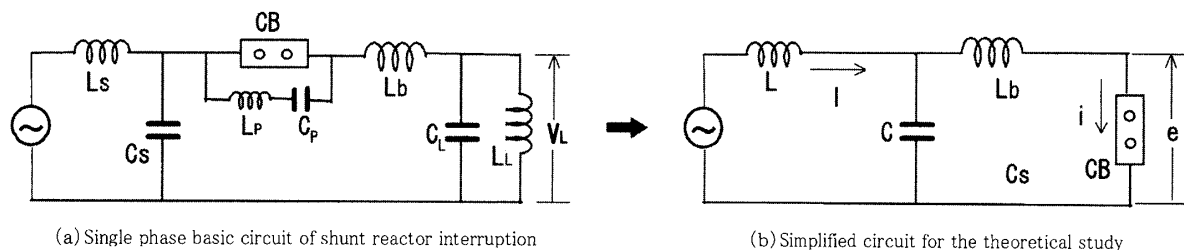


Fig.1 Single phase shunt reactor circuit and its simplified circuit

(b)の回路では $L = L_s + L_L$ $C = \frac{C_s C_L}{C_s + C_L}$ とし、 L_p および C_p の影響は無視できるものとしている。この簡易回路で遮断器アークに **Mayr** の式を適用すると次のような一連の方程式を得る。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left\{ \frac{ei}{N} - 1 \right\} \quad (1) \quad \begin{array}{l} \text{(ただし } g \text{ ; アークコンダクタンス、} \\ \theta \text{ ; アーク時定数、 } N \text{ ; アーク損失)} \end{array}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (V_c - e) \quad (2) \quad \text{(ただし } e \text{ ; アーク電圧、 } i \text{ ; アーク電流)}$$

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{1}{C} (I - 1) \quad (3)$$

またアーク損失がコンダクタンス g に依存して変化し

$$N = Bg^\beta \quad (4) \quad \text{の関係で変化するとする。}$$

をアーク抵抗 R で式 (4) を表すと

$$N = BR^{-\beta} \quad (5) \quad \text{となる。}$$

式 (1) (2) (3) (5) 式において、ある時間の各変数値 ($R_0, e_0, i_0, N_0, V_{L0}$) が微小な変動をしてそれぞれ ($R_0 + \Delta R, e_0 + \Delta e, i_0 + \Delta i, N_0 + \Delta N, V_{L0} + \Delta V_L$) に変化したときの揺動

を整理すると、近似的に次の式が得られる。(ただし近似条件は $Ri^2/N = 1$)

$$\frac{d\Delta R}{dt} = -(1 + \beta) \frac{1}{\theta} \Delta R - \frac{2R_0}{i_0 \theta} \Delta i \quad (6)$$

$$\frac{d\Delta i}{dt} = \frac{1}{L_b} (\Delta V_L - R_0 \Delta i - i_0 \Delta R) \quad (7)$$

$$\frac{d\Delta V_L}{dt} = -\frac{1}{C} \Delta i \quad (8)$$

(6) ~ (8) 式をラプラス変換して整理すると

$$S^3 + S^2 \left(\frac{1+\beta}{\theta} + \frac{R_0}{L_b} \right) + S \left\{ \frac{1}{L_b C} - (1-\beta) \frac{R_0}{L_b \theta} \right\} + (1+\beta) \frac{1}{L_b C \theta} = 0 \quad (9) \text{ が得られる。}$$

この特性方程式の根の実部が負になる条件で (6) ~ (8) が安定な解を有する。したがって安定条件

$$R_0 < \frac{\theta}{(1-\beta)C} - \frac{(1+\beta)L_b}{\theta} \quad (10)$$

が得られる。この式からアーク抵抗がアークパラメータ (θ , β) および回路定数 (L , C) によって決まる値より大きくなると不安定振動が発生する。

また臨界点における振動周波数 ω_0 については

$$\omega_0 = \sqrt{1-\beta^2} \frac{1}{\theta} \quad (11)$$

となり、ほぼアークパラメータによって決まる。

以上は簡易回路による数式からの検討であるが、基本回路で電流シミュレーションを行った場合の波形例を Fig.2 に示す。左は $L=200\mu\text{H}$, $\beta=0.4$ 一定とし、時定数を $\theta=20\mu\text{s}$, $10\mu\text{s}$, $5\mu\text{s}$ とした場合の臨界電流域の波形例である。

時定数 $20\mu\text{s}$, $10\mu\text{s}$, $5\mu\text{s}$ のとき、臨界電流域での抵抗値 R_0 および臨界電流域の振動周波数を図の右に表示している。T は式 (10)、(11) で示した式による簡易回路の計算値、S はシミュレーション波形からの算定値を示している。臨界電流域抵抗値 R_0 は、時定数 20 , $10\mu\text{s}$ ではほぼ 70Ω でシミュレーション値と簡易計算値が一致しているが、時定数 $5\mu\text{s}$ では両者でずれが生じている。これは時定数が小さくなると近似条件を保持し難くなっているものと思われる。振動周波数に関して両者はよく一致した結果が得られた。このことは電流振動の安定、不安定が式 (10)、(11) より推定できることを示している。

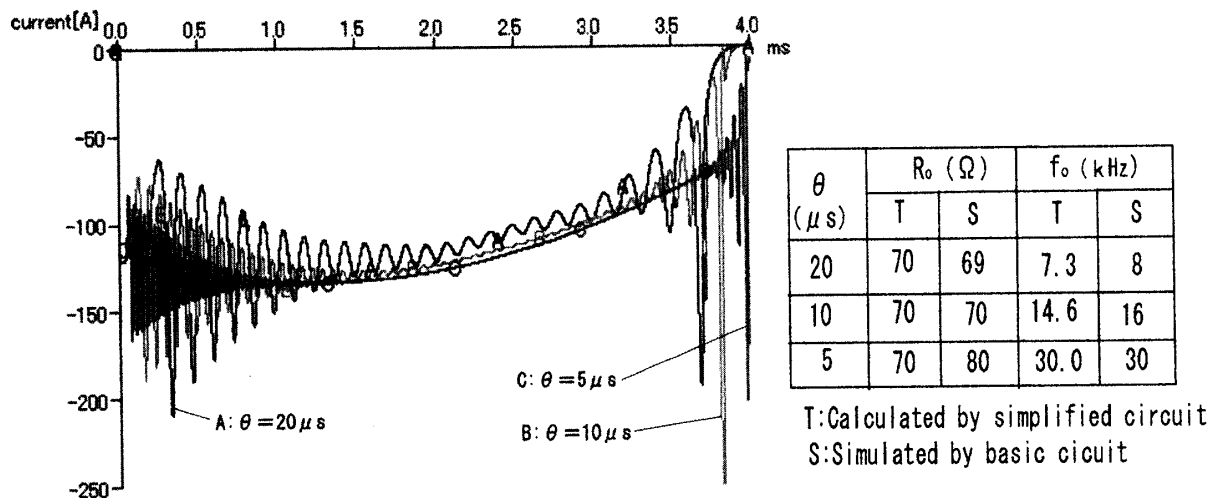


Fig.2 Critical current oscillation at the arc time constant of 20,10,5 micro seconds

Fig.3に120kV、100A条件で遮断試験した電圧、電流の実測波形例を示す。3) 電流に振動が発生し、臨界点に近い条件となっている。アーク時間が8msと長いケースの遮断で、図のA点、B点ではアークのルーピングが拡大し短絡が生じたと推定される。実測アーク抵抗の変化等から本ケースのアーク時定数は約15 μ sと推定されている。波形から臨界領域のアーク抵抗は70 Ω 、振動周波数は7.9kHzであり、Fig.2のシミュレーションとほぼ同等の結果が得られている。

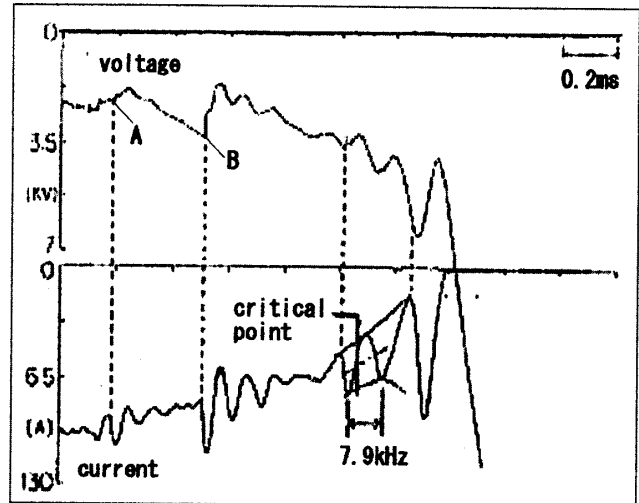


Fig.3 Current & voltage oscillation obtained by experimental test (arc duration 8ms)

3. 電流振動と電流遮断後の過渡電圧

電流不安定現象が発生するアーク抵抗は近似的に式(10)で表してよいことが分かった。この式によると、アークパラメータ θ 、 β が一定の場合、線路インダクタンス L_b 、並列キャパシタンス C_l に影響される。 C_l 値を変えたときの振動電流波形例をFig.4に示す。

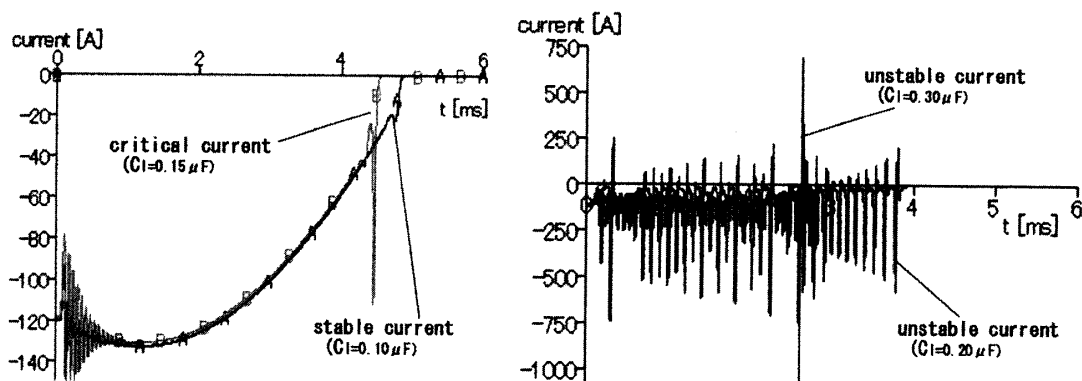


Fig.4 Current oscillation wave for capacitance parallel with reactor ($\theta=10\mu$ s $\beta=0.4$)

図は時定数10 μ s、 $\beta=0.4$ 一定で、 C_l 値を0.15 μ Fから0.30 μ Fと変化させたときの電流を示している。左図の曲線Aはキャパシタンス0.10 μ Fの電流で60Hzのリアクトル電流に殆ど振動電流が発生せず、安定している。曲線Bは0.15 μ Fの場合であり一旦振動が発生した後減衰、電流零点に近くなり再度振動が発生、拡大する臨界電流域となっている。右図はキャパシタンスが0.20 μ F、0.30 μ Fと大きくなった場合の波形を示している。いずれも振動電流は拡大し不安定振動振動となっており、キャパシタンスが大きくなると振動電流振幅が拡大する。このため60Hz電流零点より前に振動電流零点が発生、電流裁断を生じる。裁断するかどうかは、電流勾配 di/dt と遮断能力に関係する。

Fig.5 には遮断過程における極間の電圧－電流特性を示している。アークの電圧－電流特性はアークの不安定状態が電流振動をもたらし、極めて短い期間内で回路とアークのエネルギーの相互作用が行われている様相を示している。

Fig.1 の基本回路の場合遮断電流 i_{ch} とするとエネルギー保存則から次式が成立する。

$$\frac{1}{2}C_L V_O^2 = \frac{1}{2}C_L V_L^2 + \frac{1}{2}L i_{ch}^2 \quad (12)$$

(ただし V_O : リアクトルのピーク電圧、 V_L : 遮断電流零点におけるリアクトル電圧) また遮断電流 i_{ch} とキャパシタンスは次の関係で表されることが多い。⁴⁾

$$i_{ch} = \lambda \sqrt{C} \quad (13)$$

λ は遮断係数遮断器、消弧ガス、アーク時間などによって変化すると考えられる。 C は遮断器に並列なトータルキャパシタンスを示している。

(12) 式によればリアクトル両端に生じる過電圧倍数 K_a は

$$K_a = \frac{V_a}{V_O} = \sqrt{1 + \frac{L}{C_L} \frac{i_{ch}^2}{V_O^2}} \quad (14) \quad \text{となる。}$$

遮断器に並列のキャパシタンス C がリアクトルの並列キャパシタンス C_L より十分大きく、 C_p が無視できる場合、(13) 式は次のように表すことができる。

$$K_a = \sqrt{1 + \frac{3\lambda^2}{2\omega Q}} \quad (15)$$

ただし Q はリアクトル3相容量である。

上記シミュレーションにおいて不安定振動重畳によって遮断を生じる場合は振動電流周波数が高く、遮断電流値は遮断器電流零におけるリアクトル電流に相当すると考えられる。

Fig.6 に電流と電流遮断後の過渡電圧の変化状況を示す。

Fig.6 において①、②、③、④、⑤、⑥はキャパシタンスをこの順で増加させたものである。図中段に遮断電流を示す。①では振動がなく②ではわずかに振動が発生するが減衰している。これに対し④では不安定振動となり、⑤ではさらに電流振幅が拡大する。⑥

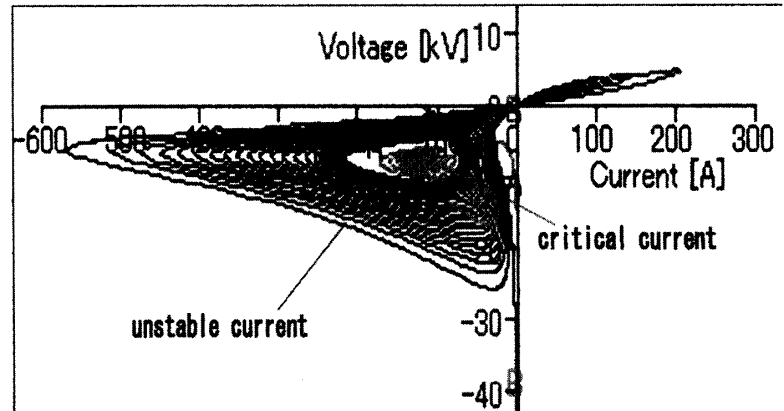


Fig.5 Family of v-I characteristics of the arc behaviors associated with CB switching

ではさらに振幅拡大となり、電流に振動が発生した時点で電流零点を迎え遮断する。

図上段は電流遮断後のリアクトル電圧の変化を示している。①、②のケースでは電流が安定状態または臨界状態で、電圧のピークは小さい。④、⑤と振動電流が拡大すると遮断電流も大きくなり、リアクトル電圧が高くなる。⑥では振動電流の振幅は拡大するが、早期に遮断するため、電圧ピークは小さくなる。

図下段はリアクトル電流の変化を示している。遮断電流が零になった時点での遮断電流が、①～⑥で変化するが、これによりリアクトルの残留エネルギーが変化し、リアクトル電圧のピーク値に影響を与えている。

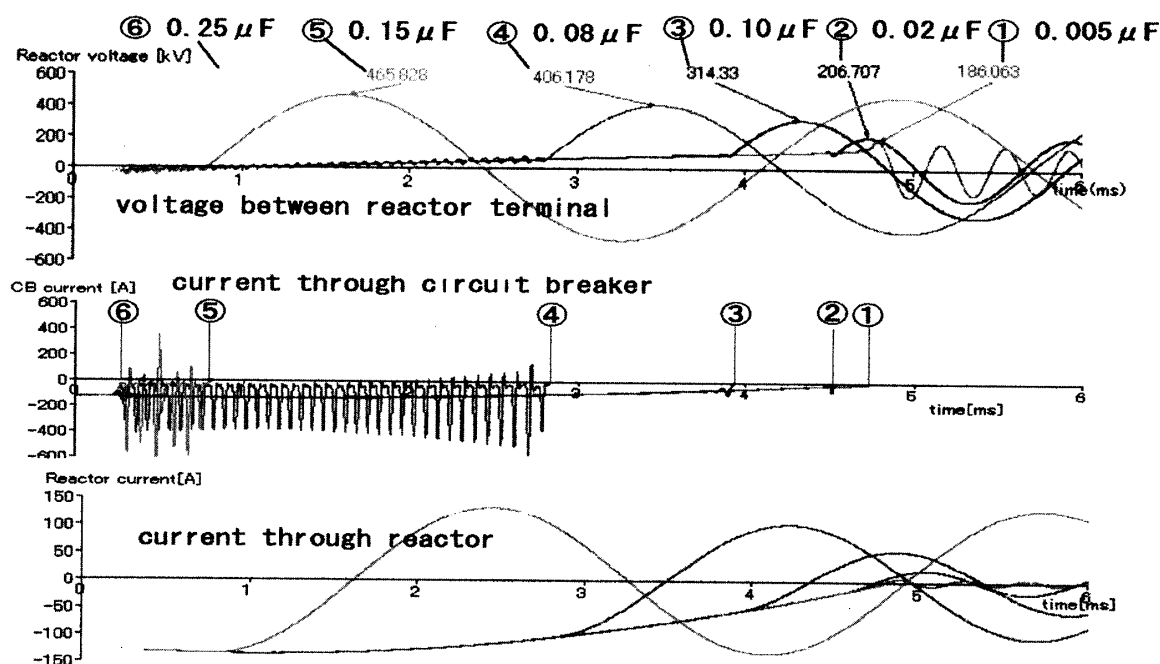


Fig.6 CB current, reactor current, and reactor voltage near interruption

4. アーク時定数、遮断電流と過電圧

系統電圧 120kV、リアクトル電流 100A とし Fig. 1 の単相回路遮断した場合の過電圧変化例を Fig.7 に示す。アーク時定数は時間的に一定とし、アーク損失係数 $B=10\text{MW}$ 、損失指数 $\beta=0.4$ でのシミュレーション例である。リアクトル並列キャパシタンス C_L が大きくなると前述のように不安定振動電流が発生、キャパシタンス値が大きくなると共に振幅が拡大、遮断電流値が大きくなり過電圧は高くなる。さらに C_L が大きくなると、電流が早く零点を迎え、リアクトル電流が大きく、リアクトル電圧が小さい位相での電流遮断となり、結果的には過電圧が相対的に低くなり、その後過電圧は直線的に低下する。これは遮断電流 i_{ch} が電流遮断時のリアクトルの残留電流値 i_{res} と等しいと考えた式

$$\frac{1}{2}C_L V_o^2 = \frac{1}{2}C_L V_a^2 + \frac{1}{2}L i_{res}^2 \quad (16)$$

において、 $V_a = 0$ となるため、過電圧変化は概略

$$V_o = i_{res} \sqrt{\frac{L}{C_L}} \quad (17)$$

にしたがって変化するものと考えられる。

Fig.7 (a) にみられるように、コンデンサにより電圧が変化するが、アーク時定数が小さくなると過電圧の最高値が大きくなり、 $\theta = 1 \mu s$ では過電圧倍数は最高 5 倍程度となっている。

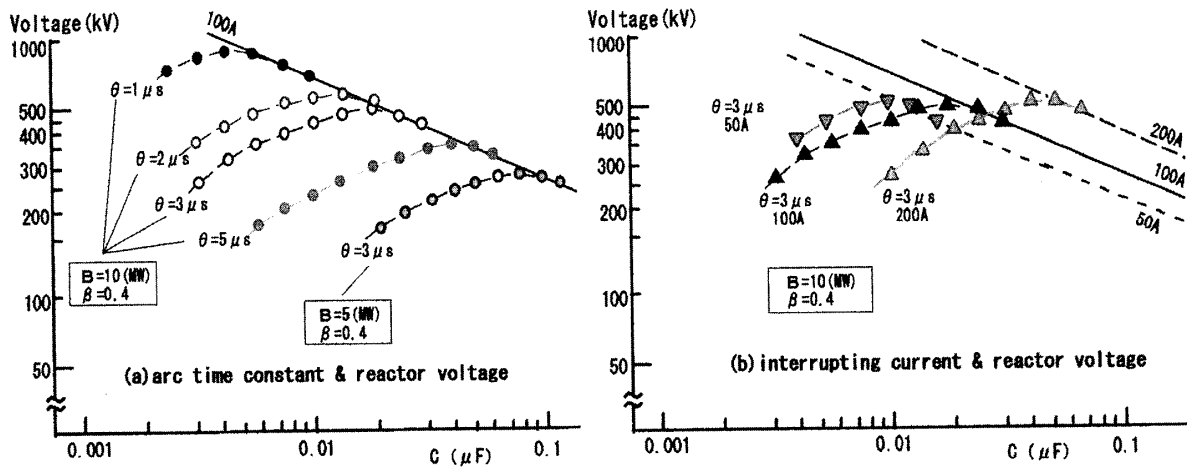


Fig.7 Reactor over voltage for arc time constant and interrupting current

また Fig.7 (b) は時定数を $3 \mu s$ の場合、リアクトル電流を変化したときの過電圧変化を比較したものである。電流が大きくなると過電圧最高値はやや高くなっているが、大きな変動はみられない。ただ最高値となる並列キャパシタンスは変化し曲線が移動している。

5. コンダクタンス依存モデルにおける時定数指数、損失指数と過電圧

Mayr モデルにおいてアーク時定数およびアーク損失がアークコンダクタンスに依存して変化し

$$\theta = A g^\alpha \quad (18)$$

$$N = B g^\beta \quad (19)$$

で表すことができるとしたアークモデル(コンダクタンス依存形 Mayr モデル²⁾³⁾)におけるアーク時定数指数 α 、アーク損失指数 β と過電圧について検討した。現在遮断器の消弧ガスに関しては地球環境問題から SF_6 代替ガスが研究されているが、ガスの種類によりこれらの指数値が変わることが知られている。⁴⁾

Fig.8 に α と β の変動による過電圧の変化を示す。図にみられるようにアーク時定数一定の場合 β の値が大きくなるにしたがって過電圧は増大する。

またアーク損失パラメータ B 、 β を一定とし時定数指数 α を大きくすると過電圧は高くなり、同時に過電圧の変化度合いは小さくなる現象が見られる。これは α が大きくなるに伴い零点近傍のアーク時定数が小さくなり周波振動の高い di/dt を遮断する能力が高くなることによるものと思われる。

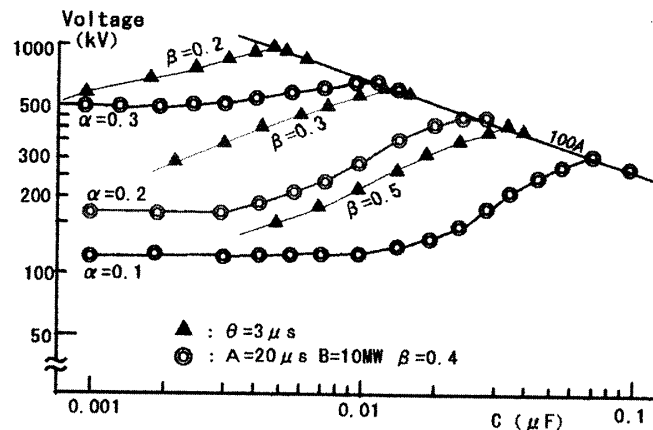


Fig.8 α , β variation and over voltage

6. 結言

分路リアクトル回路、変圧器励磁電流遮断では遮断後の過電圧が問題となる。ここでは回路および遮断器アークパラメータが遮断直後の電流不安定現象や過電圧に与える影響を研究し次の結果を得た。

- (1) 回路解析により得た不安定発生時のアーク抵抗および電流振動周波数が実回路模擬シミュレーション、実機試験実測値にほぼ一致し、不安定現象推定が可能となった。
- (2) リアクトル電流、並列キャパシタンス、アーク時定数、アーク損失等のパラメータが過電圧に与える影響を明らかにした。
- (3) コンダクタンス依存形アークモデルにおいて、時定数指数および損失指数の影響が明らかになった。

現在さらにアークパラメータと di/dt 遮断能力および非線形特性リアクトルの過電圧への影響の検討を進めているが別の機会に報告する。これら一連の検討により絶縁回復と再点弧現象および鉄共振現象のシミュレーションの精度を向上できるものとする。

なお本研究は福井工業大学特別研究費の交付を受けて実施したものである。

参考文献)

- 1) 電気学会技術報告(Ⅱ部)「小電流開閉試験法の検討」 電気学会遮断器専門委員会編
- 2) 吉永淳「コンダクタンス依存形アークモデルと電流遮断特性」福井工業大学研究紀要第37号 2007年3月
- 3) 佐久間秀一・亀井健次他「遅れ小電流遮断における電流振動現象」SPD-89-21
- 4) C.M.Portela,S.A.Morais,et.al. "CIRCUIT-BREAKER BEHAVIOUR IN REACTOR SWITCHING:APPLICABILITY AND LIMITATIONS OF CHOPPING NUMBER"
- 5) 吉永淳・池邑繁樹・山崎祐太・高岡輝男「リアクトル回路遮断におけるアークパラメータと過電圧」平成19年電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 A-38
- 6) 望月邦生他「各種ガスの電流遮断性能評価」電学論B Vol.124 No.2 2004

(平成20年3月31日受理)