

特 集 論 文

ガスVTの鉄共振現象の解析と対策

Analysis and Countermeasure of Ferroresonance Phenomena of SF₆ Gas Insulated Voltage Transformer

小 島 広 稔** H. Kojima	久 保 敏 裕* T. Kubo
中 島 宗 一** S. Nakajima	黒 田 和 宏* K. Kuroda

概 要

ガスVTは、ガス絶縁開閉装置（GIS）の構成機器である計器用変圧器として広く適用されているが、系統条件によっては鉄共振が発生することがある。当社では、各種の鉄共振現象に対し、最適な対策を実施している。

本稿では、ガスVTの鉄共振現象の発生原理を解説し、その解析事例および鉄共振抑制技術について報告する。

Synopsis

Gas VTs (SF₆ gas insulated voltage transformers) have been widely used as components of GIS. However, Gas VT may cause ferroresonance depending on system conditions. NISSIN carries out the best countermeasures for various ferroresonance phenomena.

This paper explains the principle of ferroresonance phenomenon of Gas VT, and it describes about analysis and suppression methods of ferroresonance.

1. まえがき

ガス絶縁開閉装置（GIS）は、良質の電気を供給するという基本的機能に加えて、環境への適合性や防災の安全性の向上など、数多くの要求条件を満足させる機器として、幅広く普及している。このようなGIS化に伴い、GISの構成機器である計器用変圧器として、ガスVTが広く適用されている。

しかしながら系統条件によっては鉄共振が発生することがあり、当社では各種の鉄共振現象に対し、最適な対策を実施している。

本稿では、最初に鉄共振現象の原理について解説し、鉄共振現象が発生する可能性のあるガスVTを構成要素として含む回路を紹介する。さらに、当社のシミュレーションによる解析事例と、解析と実器試験により確立した鉄共振抑制方法について述べる。

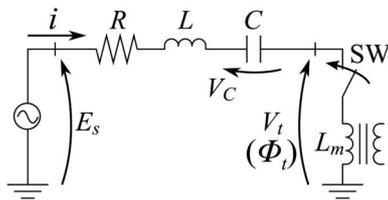
2. 鉄共振現象の発生原理

2.1 鉄共振現象

鉄心を有する機器（変圧器やVT）の励磁インダクタンス(L)と静電容量(C)が共存している回路では、遮断器開閉などの電氣的ショックによりLが一時的に磁気飽和すると、L-C間でエネルギー授受が起きて、稀にこの振動が持続することがある。これは鉄心機器特有の回路現象である為、鉄共振現象（Ferroresonance）と称し、異常唸り音や過熱による焼損、絶縁破壊、地絡検出リレーの誤動作などを引き起こす。

図1は直列コンデンサで補償した系統において無負荷変圧器を投入した事例であり、鉄共振が発生する可能性のある回路例である。この回路を用いて鉄共振のメカニズムを説明する。なお、説明は図2の波形の時間区分の順番に沿って行う。

* 技術開発研究所
** 電力機器事業本部



R, L : 回路を持つ抵抗, インダクタンス
 C : 補償用直列コンデンサ
 L_m : 巻線機器の鉄心を持つインダクタンス
 i : 巻線機器の鉄心を通る磁束

図1 鉄共振現象の基本回路

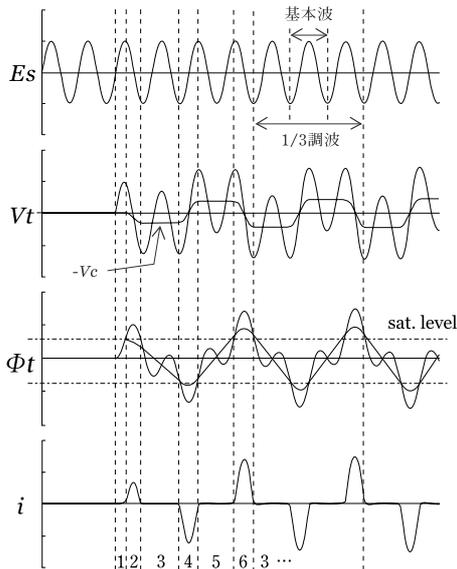


図2 鉄共振波形例 (1/3調波振動)

- (1) 無負荷変圧器のSWを投入すると、電源 E_s により鉄心が励磁され始めるが、この時点では電流 i は非常に小さい。(初期状態では、残留磁束は無かったものとする)
- (2) 磁束 Φ_t が鉄心の飽和 (sat.) レベルを超えると、鉄心インダクタンス L_m が3桁ほど急減し、電流 i が急増する。これによりコンデンサ C が直流的に充電される。
- (3) 電源の位相が変わり、再び鉄心が非飽和となると、コンデンサの電荷は変圧器の励磁回路を介して放電される。インダクタンス L_m が大きな値に戻っている為、放電電流は小さいが、鉄心の磁束を(2)と逆方向にシフトさせていく。
- (4) 次に鉄心が飽和した際に、電源の位相が逆転していると、コンデンサと電源の電圧極性が一致し、(2)とは逆方向の大電流が流れる。
- (5) これによりコンデンサの電荷は一気に放電され、今度は逆極性に充電される。これは(3)の極性が反転している状態になっており、コン

デンサは(3)とは逆方向に徐々に放電する。

- (6) (4)と逆極性で同じ現象が起こる。以降、変圧器や回路の抵抗分 R による損失を電源からの電荷供給が補償する形で(3)~(6)が繰り返され、振動が長時間継続する。

以上の原理から明らかのように、鉄共振解析では以下の回路定数を正確に把握することが必要である。

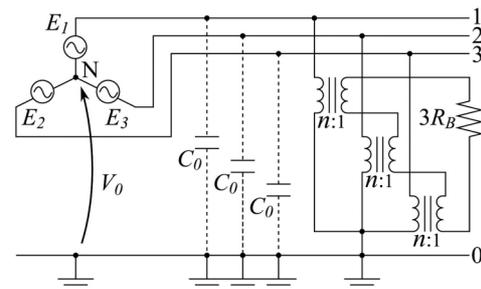
- 静電容量 C
- 鉄心の励磁インダクタンス L_m
- 回路の損失 (鉄心機器の鉄損など)

2.2 中性点不安定現象

図3(a)に示す非接地系統に接地形計器用変圧器(EVT)が設置された回路では、電気的ショックにより系統の中性点電圧(零相電圧)が異常振動し、長時間持続する場合がある。これはEVTの励磁インダクタンスと系統の対地静電容量による鉄共振現象の一種で、中性点不安定現象と呼ばれる。

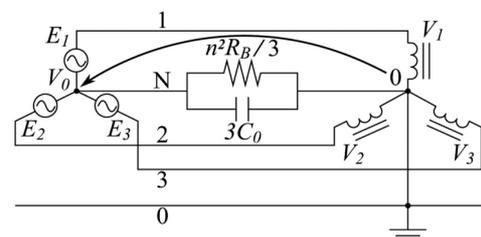
図3(a)の回路は図3(b)の等価回路で表す事ができ、 C と鉄心を有する L が共存しているという点において、図1と基本的に同じであることが分かる。ただし、図3では励磁インダクタンスが3相分あり、これらが順次飽和する点が異なっている。

なお、図3(b)から分かるように、この現象では電源側の中性点電位が振動する。この為、対地電圧に影響が現われるのに対して、線間電圧はほとんど影響を受けないのが特徴である。



C_0 : 系統各相を持つ対地静電容量
 R_B : EVT三次オープンデルタ(または二次) 負担抵抗

(a) 非接地系統にEVTを設置した回路



(b) 上図の等価回路⁽¹⁾

図3 中性点不安定現象の基本回路

また、実測時の回路条件による再現シミュレーション結果を図7(b)に示す。シミュレーション結果と実測結果は良好に一致している事が確認できる。

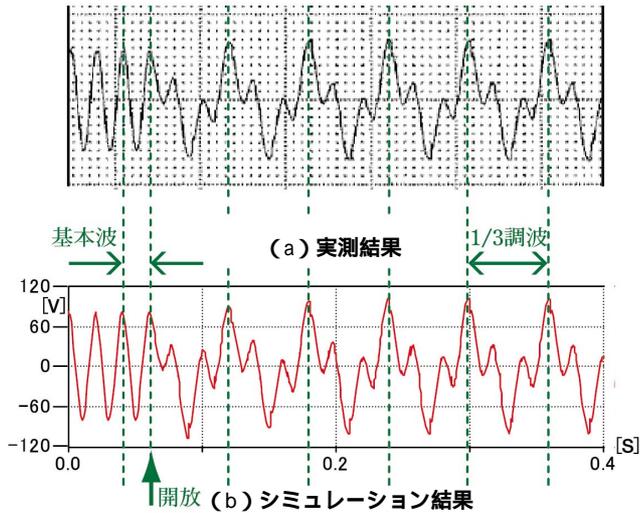


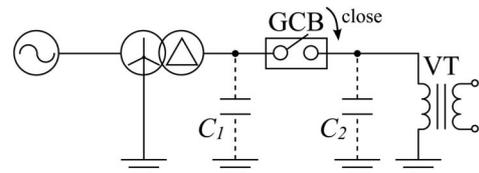
図7 VT二次電圧波形の比較

4.2 中性点非接地系統での対地浮遊容量とVT (中性点不安定)

図8は海外の500kV変電所の三次回路用GIS系統の回路図である。なお、三次回路は非接地である。この系統において無負荷で遮断器を投入したところ、表1に実測波形として示した零相電圧(各相に同じ大きさ、同じ位相で含まれる電圧)が発生した。零相電圧は基本周波数50Hzの1/2調波にあたる25Hzで振動してお

り、各相の電圧には、基本波成分に1/2調波成分が重畳していることが分かる。

そこで、実系統の条件による再現シミュレーションを実施した。表1に示した解析結果の波形でも実測波形と同様の1/2調波振動が発生していることから、中性点不安定現象が発生したことが確認された。なお、解析結果から、中性点不安定現象が発生しても線間電圧には影響が現われないことが分かる。



C₁: 変圧器三次巻線対地静電容量
C₂: GIS+VT対地静電容量

図8 海外500kV変電所三次回路用GIS系統の回路構成

5. 鉄共振抑制技術

5.1 ZD (可飽和リアクトル) による抑制

鉄共振の抑制には、抵抗負担の接続などの方法があるが、その一つにZD (可飽和リアクトル) をVTの二次側に接続する図9の方法がある。この方法は効果的かつ経済的であり、CVT (Capacitor Voltage Transformer) の鉄共振対策として当社でも長年の実績がある。図10にZDによる鉄共振の抑制例を示す。

表1 VT各相および線間電圧と零相電圧 (実測波形と解析結果)

	実測波形	解析結果
	各相の50Hz電圧波形の振幅が交互に変動(1/2調波振動が発生)	50Hz 25Hz
A相電圧		
B相電圧		
C相電圧		
零相電圧		
線間電圧 (AB)	25Hz振動成分(1/2調波振動)が零相電圧として発生	
線間電圧 (BC)		
線間電圧 (CA)		

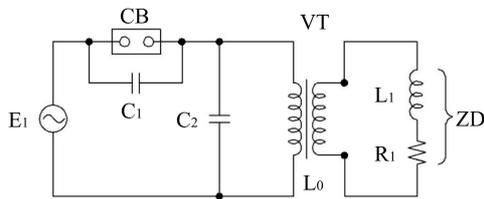


図9 ZDによる抑制方法

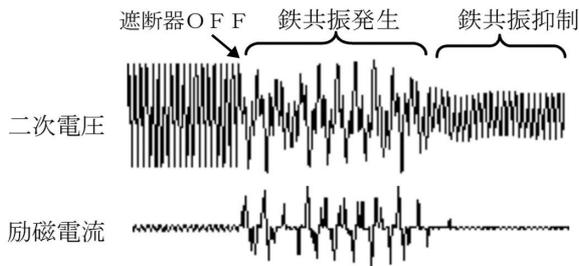
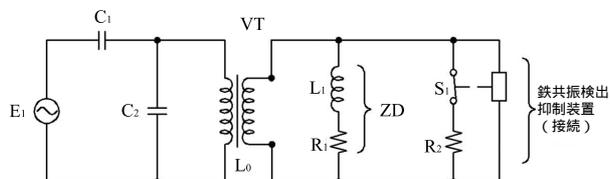


図10 鉄共振抑制波形例(シミュレーション)

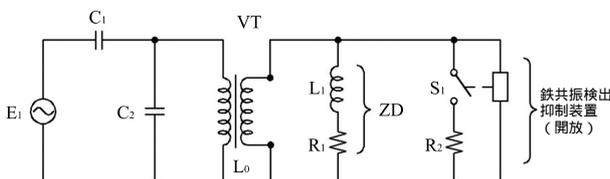
5.2 鉄共振検出リレーと抵抗器の時限接続による抑制

ZDは鉄共振抑制の有効な対策であるが、 C_1 が特に大きいなどの特殊な条件では、鉄共振が抑制できない場合がある。

ZDのみでは鉄共振が抑制できない場合の対策として、鉄共振検出抑制装置を開発した。鉄共振検出抑制装置は、鉄共振を検出すると図11(b)から図11(a)の回路になり、VTの二次側に大きな負担を接続する。図12に鉄共振検出抑制装置の実際の試験波形(a)とシミュレーション波形(b)を示す。鉄共振を抑制後は再び図11(b)の回路になり、鉄共振検出抑制装置は開放される。

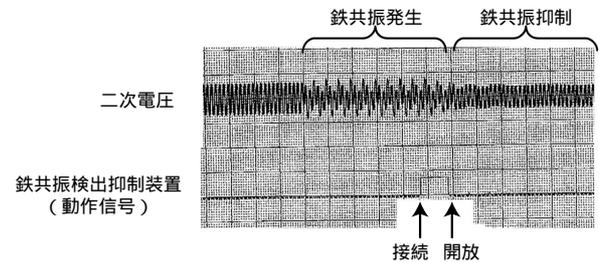


(a) 鉄共振検出抑制装置の接続時

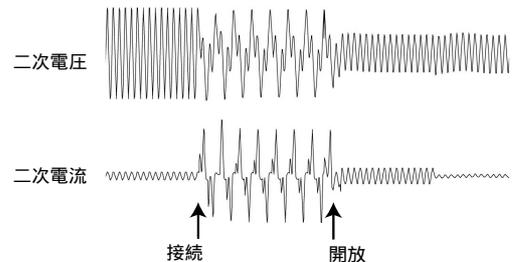


(b) 鉄共振検出抑制装置の開放時

図11 鉄共振検出抑制装置の動作



(a) 実器による試験結果



(b) シミュレーション結果

図12 鉄共振検出抑制装置の動作波形

5.3 鉄共振検出抑制装置

図13に鉄共振検出抑制装置の外観を示す。鉄共振検出抑制装置は、鉄共振の低周波振動を検出する電子式検出部(a)と鉄共振を抑制する負担部(b)で構成されている。



(a) 検出部



(b) 負担部

図13 鉄共振検出抑制装置の外観

6. あとがき

シミュレーションと実器による試験により、鉄共振現象の対策について技術を向上することができた。

従来、鉄共振現象は、ガスVTに要求されている一般的な仕様ではとかく見落され、系統に接続されてから顕在化されるケースが見られた。今後は顧客との設計情報として、鉄共振現象の検討に必要な回路定数を事前に交換し、適切な対策を行うことで、信頼度の向上に努めていきたい。

参考文献

- (1) 乗松立木：「計器用変圧器回路の中性点不安定現象および転移現象」、電気学会雑誌74巻784号、1954-01

執筆者紹介



小島広稔 Hiroto Kojima
電力機器事業本部
変成器事業部
設計部



久保敏裕 Toshihiro Kubo
技術開発研究所
解析技術センター
系統技術グループ



中島宗一 Soichi Nakajima
電力機器事業本部
変成器事業部
設計部 主任



黒田和宏 Kazuhiro Kuroda
技術開発研究所
解析技術センター
系統技術グループ長