Elucidation of a Peculiar Phenomenon of Voltage Measuring at a Substation

Kouya Takafuji Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Takashi Satou Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Hisanori Itou Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Isao Kouda Member (Chuden CTI CO., LTD)

Toshiaki Haba Non-member (Chuden CTI CO., LTD)

Atushi Satake Member (Chuden CTI CO., LTD)

Eiichi Haginomori Member (Chuo University)

Keywords: voltage drop, saturation of voltage transformer, line arrester, continuous discharge

1. Introduction

An automatic fault-recorder installed in a substation of Chubu Electric Power Company detected a peculiar phenomenon that bus-bar voltage fell to around 20–30% of the nominal value for a short time (about 8–10 cycles) though the electric current didn't change during the periods. The phenomenon was recorded several times.

We assumed various causes of this phenomenon, and conducted simulations with an analog-type electric power simulator. However, the phenomenon was not able to be identified through the simulation.

So we thought that it was not an actual phenomenon on the power system, but a phenomenon on the measurement circuit of VT(voltage transformer) by saturation. and this was caused by lightning strokes to the transmission line with lightning arresters, which have been increasingly installed to the lines in recent years. Then the simulation for the VT was conducted by EMTP. As a result, the same phenomenon as recorded was able to be observed, and the validity of the estimated cause was confirmed.

2. Occurrence Mechanism of the Phenomenon

We estimated the mechanism of the phenomenon from various situations as follows.

(1) Lightning struck the power line directly The record of Lightning Location System (LLS) shows that lightning struck the power line at the same time the phenomenon was recorded, which was eliminated by the line arrester.

(2) Lightning energy is supplied to VT as direct current by the effect of the line arrester In the power line equipped with the arrester, lightning energy under the arrester's residual voltage is supplied to the power system as direct current.

The direct current can be temporally stored in the capacitance of the power system and then gradually discharged through NGR (neutral point earth resistance) and the VT neutral point.

(3) Iron core of VT was saturated by direct current, thus the secondary voltage of VT dropped VT has the feature that the secondary voltage drops easily when its iron core is saturated because the primary leakage impedance is very large. The leakage impedance of the VT for 77 kV bus is about 100 H, which is about 800 times compared with a 154 kV/77 kV transformer.

(4) VT saturation continued by the continuous lightning discharge In this phenomena, the voltage drop continued by about 10 cycles. However, EMTP simulation shows that just a single stroke of lightning causes not 10 cycle drop, but only 2 or 3 cycle drop. On the other hand, NGR current of an fault-recorder shows that direct current was supplied continuously. Therefore, our estimation is that this direct current was supplied by "continuous discharge", which continued several hundred milli-seconds between lightning strokes. This is because a lot of lightnings occurred when the phenomenon was recorded.

3. EMTP Simulation

The simulation result of EMTP is shown below, which is almost the same as the recorded wave form.

Fig. 1. EMTP simulation result-wave form of bus voltage

4. Influence to Protection Relays

On a short-circuit fault, the under-voltage relay (failsafe of the differential-current relay) or the directional-distance relay has a possibility of mal-operation. However, as the both cannot act at the same time, a trip due to mal-operation will never happen. On a ground fault, protection relays will not mal-operate because zero-phase voltage and current caused by the phenomenon is limited to direct current or higher harmonics wave.

5. Conclusion

In this paper, we elucidated the cause of peculiar phenomenon of the voltage measuring at a substation, and found that the phenomenon doesn't negatively affect the operation of protection relays.

変電所における計測電圧特異現象の解明

正員 高藤 耕哉* 正員 佐藤 孝*
 正員 伊藤 久徳* 正員 香田 勲**
 非会員 幅 敏明** 正員 佐竹 厚志**
 正員 萩森 英一***

Elucidation of a Peculiar Phenomenon of Voltage Measuring at a Substation

Kouya Takafuji*, Member, Takashi Satou*, Member, Hisanori Itou*, Member,
 Isao Kouda**, Member, Toshiaki Haba**, Non-member,
 Atushi Satake**, Member, Eiichi Haginomori***, Member

An automatic fault-recorder installed in a substation of Chubu Electric Power Company detected a peculiar phenomenon that bus-bar voltage fell to around 20–30% of the nominal value for a short time (about 8–10 cycles) though electric current didn't change during the period. The phenomenon was recorded several times.

In this paper, we analyzed the origin of this phenomenon and conducted simulations by EMTP. As a result, we estimated that this phenomenon occurred by the saturation of VT (voltage transformer), and this saturation caused by lightning strokes to the transmission line with line arresters, which have been increasingly installed in recent years. Moreover, we evaluated the influence of the phenomenon to protection relays.

キーワード：電圧低下，VT 飽和，送電線アレスタ，連続放電

Keywords: voltage drop, saturation of voltage transformer, line arrester, continuous discharge

1. はじめに

近年，製造業等では，瞬時電圧低下に鋭敏な機器が多く使用されてきており，瞬時電圧低下による社会的影響が益々大きくなってきている。

このような状況の中，中部電力管内 77kV 系統において，雷が多発している気象条件の中，電流が変化しないにもかかわらず，母線電圧が短時間（約 8 サイクル～10 サイクル程度）20～30% 近くまで低下する特異現象が，複数回，自動オシロ装置に記録された。

この時，電圧低下を検出する警報リレーは動作したが，保

護リレーが動作していなかったため，現象を記録した変電所において，保護リレーや自動オシロ装置の健全性を確認したが異常は発見されなかった。

そこで，中部電力が保有するアナログ型電力シミュレータを使用して，対象系統を模擬し，様々な事象を想定して同様の現象が発生するかシミュレーションを行ったが，電流が変化せずに電圧だけが低下する現象は確認されなかった。

このため，本現象は，電力系統側の現象ではなく，VT（計器用変圧器）の飽和によって発生した計測回路の事象ではないかと考えた。そして，その飽和は，近年，整備が拡大されてきている送電線アレスタ（避雷器）の動作によって雷撃エネルギーが VT に供給されたため発生したものと推定し，EMTP によるシミュレーション解析を行った。その結果，ほぼ実測値とおなじ現象を再現することができ，推定した発生原因の妥当性を確認することができた。

本稿では，本現象の発生メカニズムと，その妥当性を確認するため行ったシミュレーション結果，本現象が発生した場合に保護リレーへ与える影響について述べる。

* 中部電力（株）

〒461-8680 名古屋市中東区東新町 1 番地

Chubu Electric Power Co., Inc.

1, Higashi-shin-cho, Higashi-ku, Nagoya 461-8681

**（株）中電シーティーアイ

〒455-0842 名古屋市港区桶永 2-1-80 桶永ビル

Chuden CTI CO., LTD

2-1-80, Inaei, Minato-ku, Nagoya 455-0842

*** 中央大学

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

Chuo University

1-13-27, Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551

2. 特異現象の概要

(i) 発生年月

平成 8 年 7 月, 平成 16 年 2 月 (中部電力 M 変電所)

平成 17 年 8 月 (中部電力 S 変電所)

(ii) 気象 いずれも雷が多数発生中。

(iii) オシロ装置記録 Fig.1 には, M 変電所のオシロ装置が記録した波形を, Fig.2 には, M 変電所 77kV 系統図とオシロ装置設置箇所を示す。Fig.1 より, 77kV 母線電圧が 3 相とも (V_r , V_s , V_t) 10 サイクル程度継続して, 残り電圧 20%~30% 近くまで低下しているが, バンク二次電流 (I_r , I_s , I_t) が変化 (増加) していない。

(iv) 状況

① 警報リレー (UV) は動作したが, 保護リレーによる

Fig.1. Wave forms of voltage and current recorded in automatic fault-recorder (M Substation).

Fig.2. Power system diagram (M Substation and related power system).

トリップは無かった。なお, 後日, 保護リレー, オシロ装置等を点検したが異常は無かった。

② 現象発生と同時に, 当該系統において, LLS (落雷位置標定装置) の動作記録が多数残っていた。

3. 電気回路理論に基づいた考察

今回の現象の特徴的な事は, 電圧は異常に低下 (電圧低下 70%, 残り電圧 30%) しているにもかかわらず, 故障電流が流れていない (バンク二次電流に顕著な変化なし) ことである。

この現象は, 電気回路理論上起こりえない事象であり, 以下に考察を示す。

〈3・1〉 故障点インピーダンスが接続された場合

ここでは, 現象発生時に, 系統故障が発生したことを想定した考察を行う。

Fig.3 に M 変電所の 77kV 系統に, 故障点インピーダンス Z_{Lx} が接続される回路モデルを示す。

故障前のバンク二次電流 I_2 は (1) 式, 故障後のバンク二次電流 I_2' は (2) 式で表される。

$$I_2 = \frac{Es1}{Zs1 + ZL1} \dots\dots\dots (1)$$

$$I_2' = \frac{Es1}{Zs1 + (ZL1 \times ZLx)/(ZL1 + ZLx)} \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式の分母のうち $(ZL1 \times ZLx)/(ZL1 + ZLx)$ は $\frac{ZL1}{(ZL1/ZLx) + 1}$ となり, (1) 式の分母のうち $ZL1$ と比較すると

$$ZL1 > \frac{ZL1}{(ZL1/ZLx) + 1}$$

となる。

これはバンク二次電流が $I_2' > I_2$ の関係にあることを示している。

また, $I_2' - I_2 (> 0)$ の電流増加分が, 変圧器インピーダ

Es1: 上位系統の電源
Zs1: M 変電所バンクのインピーダンス
ZL1: M 変電所バンク以下の負荷インピーダンス
ZLx: 故障点インピーダンス
 I_2 : 故障前のバンク二次電流
 I_2' : 故障後のバンク二次電流
 I_f : ZLx へ流れる電流
 $Z_o = \frac{Zs1 \times ZL1}{Zs1 + ZL1}$: 端子 a1-b1 から電源側インピーダンス

Fig.3. Equivalent circuit model (Case of system fault).

ンス (Z_{s1}) を流れることで電圧降下が生じ、バンク二次電圧 V_2 は低下する。

つまり、故障点インピーダンスが接続されればバンク二次電圧は下がり、電流は増えることになる。

〈3・2〉 電源を有する異系統が並列された場合 ここでは、現象発生時に、電源を有する異系統が並列されたことを想定した考察を行う。

Fig. 4 に M 変電所の 77 kV 系統に、電源を有する異系統が接続される回路モデルを示す。

SW を閉じたときに流れる電流 I_3 は、鳳-テブナンの定理を用いて、(3) 式のように表せる。

$$I_3 = \frac{V_2 - V_x}{\frac{Z_s \times Z_l}{Z_s + Z_l} + \frac{Z_{x1} \times Z_{xl1}}{Z_{x1} + Z_{xl1}}} \dots\dots\dots (3)$$

SW を閉じたとき、 I_2 に変化はないため、M 変電所のバンク二次電流 ($I_2 + I_3$) に変化がないとすると、 $I_3 = 0$ でなければならない。このことから、 $I_3 = 0$ として (3) 式を解くと、 $V_2 = V_x$ となる。

これは、バンク二次電流の変化がないとすると、M 変電所バンク二次電圧と異系統側の電圧が同じでなければならない。つまりバンク二次電圧にも変化があってはならないことを表している。

以上の考察から、本現象は、電力系統側の事象でなく、変電所内の計測回路の事象である可能性が高いと考えた。

なお、本考察では、系統に負荷が投入されたケースを想定していないが、非常に大きな負荷が投入された場合、無効電力の影響で電圧だけ低下する現象が発生する可能性はあるが、今回の事象のように 20～30% もの電圧低下が 100 ms 以上継続することは現実的に考えにくい。

Fig. 4. Equivalent circuit model (case of generator parallel in).

4. 特異現象の発生メカニズムの推定

VT が何らかの原因で飽和したのであれば、電圧のみ低下する可能性がある。

また、近年、複数箇所と同じ現象が発生しており、同時期に 77 kV 系統で急速に整備を拡大してきている送電線アレスタが影響しているものと考え、発生メカニズムを下記のとおりに推定した。

- ① 当該系統の送電線への直撃雷が発生
- ② 送電線アレスタの制限電圧以下の雷撃エネルギーが直流分として VT に供給
- ③ 直流分によって VT が飽和し、VT 二次電圧低下
- ④ 連続放電により VT 飽和が継続し、VT 二次電圧低下が継続

〈4・1〉 直撃雷の発生 LLS の落雷記録を確認したところ、現象発生と全く同時刻に、当該系統の送電線に、落雷の実績が記録されていた (Table 1 参照)。落雷の記録があった箇所を Fig. 2 に落雷想定箇所として示す。

一方、落雷記録があった送電線の設備状況を調査したところ、アレスタが設置されていた。このため、当該線路に落雷が発生した時、アレスタにより雷撃電流が除去され、保護リレーが動作しなかったものと想定した。

また、落雷には、直撃雷と誘導雷 (架空地線への落雷による逆フラッシュオーバー) があるが、EMTP によるシミュレーションの結果、誘導雷では、送電線へ印加される電圧が小さいため、VT を飽和させるだけの十分なエネルギーは供給されることが確認できたため、現象の起因は直撃雷と推定した。

〈4・2〉 アレスタ動作による VT への直流分供給 アレスタ非設置送電線へ落雷があった場合、アークホーンが動作しほとんどの雷エネルギーが大地に流れ、その後保護リレーも動作することから、VT へ雷から大きなエネルギーが供給されることはない。

一方、アレスタ設置送電線では、アレスタ制限電圧以下

Table 1. Lighting stroke recorded in LLS.

time	Point of lighting stroke		Current of Lighting stroke
	Longitude	Latitude	
17:32:36.591	137.188	35.425	14.6kA
17:32:36.939	137.175	35.381	9.5kA

Fig. 5. Lightning stroke to the line without arrester.

Fig. 6. Lightning stroke to the line with arrester.

Fig. 7. Equivalent circuit of VT.

のエネルギーは、直流分として系統へ供給される。

系統に供給された直流分は、系統の静電容量分に一旦蓄えられ系統の零相CR並列回路を通じてNGR（中性点接地抵抗）やVT中性点を通して徐々に放電していくものと考えられる。

〈4・3〉 直流分によるVT飽和と二次電圧低下 VTは、電力用変圧器等と比較して、一次側漏れインピーダンスが非常に大きく、鉄心が飽和した場合に二次側電圧が低下しやすい特徴がある。

一次漏れインピーダンスが大きい理由は、一次側コイルと二次側コイルの巻数比が大きく、一次側コイルの巻数が非常に多いことである。また、鉄心のサイズが小さいことから、鉄心の磁束密度を低くする目的で、巻数を増やす必要がある。

なお、一般の77kVクラスの電力用変圧器の漏れインピーダンスは7.7%（配電用変圧器）程度で、リアクタンス換算は約120mHである。一方今回対象の77kVVTのリアクタンスは100H程度と言われており、約800倍も大きい。

Fig.7には、VTの等価回路を示すが、UV間に直流分が流入して鉄心が飽和すると、励磁インピーダンスが小さくなる。この時、一次漏れインピーダンスが大きいと、VT二次側の電圧低下が大きくなる。

〈4・4〉 連続放電による電圧低下継続 本現象は、10サイクル程度電圧低下が継続しているが、EMTPによるシ

Fig. 8. NGR current - Fault recorder (S Substation).

Fig. 9. Continuous discharge.

ミュレーションの結果、〈4・2〉節で説明した系統の静電容量分に蓄えられた直流分の放電だけでは、電圧低下は2〜3サイクルしか継続しないことが分かった。

しかし、M変電所の自動オシロ装置が記録したNGRの電流からは、連続して直流分が供給されたことが確認できた（Fig.8参照）。

また、現象発生時に多数の雷が発生していたことから、この直流分は、“連続放電”により供給されたものと推定した。

連続放電¹⁾とは、多重雷が発生している状況で、最初の雷撃が終止した後、次の雷撃が生ずるまでの間、100A程度の小さい電流が数百ms継続する事象である（Fig.9参照）。

この連続放電により、ある程度継続して直流が供給されVT飽和による電圧低下が継続したと推定した。

5. EMTP (ATP 版) シミュレーション

〈5・1〉 シミュレーション条件 シミュレーションで使用したVT、アレスタ、送電線、NGRなどの設備モデルには、全て実際の設備定数を収集して入力した。

本書へのこれら全ての定数の記載は省略するが、本現象への関わりが大きい送電線アレスタのV-I特性をFig.10に、VTの励磁特性をFig.11に示す。

〈5・2〉 変電所へ侵入する雷撃エネルギーの試算

落雷想定箇所の送電線と変電所母線のみをモデル化して、「直撃雷」と「架空地線落雷」時のVTへ侵入するエネルギーを試算し、直撃雷の可能性が高いことを確認した。

シミュレーションモデルは、落雷想定箇所の送電線（架空地線）と変電所母線のみをモデル化し、電源は、LLS記

Fig. 10. V-I characteristic of line arrester.

Fig. 11. Excitation characteristic of VT.

Fig. 12. EMTP simulation model; Section <5.2>.

録から 10kA とした。

ケース 1:「直撃雷」とケース 2:「架空地線への落雷」で検証を行った結果、ケース 2 では、運転電圧程度の電圧しか VT に進入しないため、直撃雷でなければ本現象は発生しにくいことが確認できた (Fig. 13 参照)。

〈5.3〉 実システムモデルによる現象再現 実システムモデルを作成して、実現象の再現を行った。落雷想定箇所には、雷源として電流源を設置した。

(1) 単発の落雷のケース 連続放電ではなく、単発の落雷を想定したシミュレーション結果を Fig. 15 に示すが、2~3 サイクルしか電圧低下が継続しないことが確認できる。

(2) 連続放電のケース 自動オシロ装置で記録された NGR 電流は、電流値が小さいことから、CT 飽和のない正確な波形と考えられる。そこで、EMTP では、複数の電流源を組み合わせることで雷源を構築し、EMTP モデルの NGR 電流波形が自動オシロの NGR 電流波形と合致するように調整した。Fig. 16 の左側に実測波形、右側に EMTP モデルの NGR 電流波形を示すが、実測オシロのステップ状の変化に対し、EMTP で指数関数モデルを使用していることから、様相が完全に一致していないが、ここでは、100ms 程

Fig. 13. Test calculation of lighting energy.

Fig. 14. EMTP simulation model Section <5.3> (M Substation).

Fig. 15. Bus-bar Voltage-EMTP (M Substation).

度継続する電圧低下の再現を対象としているため、全体の変化の様子が、概ね合致するように調整している。

自動オシロ装置が記録した 77kV 母線電圧の波形と、EMTP シミュレーションによって再現した電圧の波形を Fig. 17 に示すが、100ms 程度電圧低下が継続する現象が再現できており、推定要因の妥当性が確認できた。

なお、200ms 以降の電圧低下の回復過程が、幾分異なっているが、EMTP モデルの背後システムについて、時定数が実システムと完全に一致していないためと考えられる。

また、S 変電所に発生した現象に対しても、同様のシミュレーションを行った。自動オシロ装置が記録した 77kV 母線電圧の波形と、EMTP シミュレーションによって再現した波形を Fig. 18 に示すが、ここでも、ほぼ実測値に近い現

Fig. 16. NGR current (M Substation).

Fig. 17. Bus-bar voltage (M Substation).

Fig. 18. Bus-bar voltage (S Substation).

象が再現でき、推定要因の妥当性が確認できた。

6. 保護リレーへの影響

〈6・1〉 影響範囲 送電線用アレスタは 154 kV 以下系統に適用しているため、154 kV 以下系統に適用している保護リレーを対象に評価した。

〈6・2〉 短絡保護 VT 二次側電圧が低下することから、電流差動継電方式のフェールセーフリレーである電圧低下リレーと、方向距離継電方式のメインリレーである距離リレーが、誤動作する可能性があるが、メインリレーとストッパーリレーが同時に動作して誤遮断に至ることはない (Table 2 参照)。

ただし、方向距離継電方式に関して、VT 飽和によって距離リレーが動作している間に、連続雷撃によって、フェー

Table 2. Possibility of mal-operation by VT saturation.

Short circuit protection Method	Relay		Trip
	Main	Failsafe	
Differential Current	×	○	×
Over Current	×	×	×
Transverse Differential	×	×	×
Directional Distance	○	×	× (※)

○ : Possibility of operation by VT saturation
× : No possibility of operation by VT saturation
※ : Possibility of mis-trip if a system fault occurs while VT saturation

ルセーフリレーの電流変化幅リレーが動作するような系統故障が発生すれば、保護範囲外の故障であっても誤遮断す

る可能性がある。しかし、保護機能が失われる訳ではなく、極めて希なケースであるため、想定外の故障として扱うことができる考える。

〈6・3〉地絡保護 本現象での V_o , I_o は、直流分もしくは高調波成分のみが発生しているため、保護リレーが誤動作する可能性はないと考えられる。

7. ま と め

本稿では、中部電力管内変電所にて発生した VT 飽和に伴う電圧低下現象の発生メカニズムを推定し、EMTP シミュレーションにて現象の再現を行うことで、その妥当性を確認することができた。

近年、送電線アレスタの整備が拡大してきているため、今後、同様の現象が発生する機会は増えてくるものと思われる。しかし、本稿にて、発生原因の究明と保護リレーへの影響評価を実施した結果、系統運用へ大きな支障がないことを明らかにすることができた。

今後の課題として、本現象が確認された場合は送電線に直撃雷があった可能性が高いため、送電線巡視の判断指標に活用することを検討していきたい。

(平成21年3月24日受付, 平成21年9月12日再受付)

文 献

(1) 電気学会：電気工学ハンドブック第6版(2001-1)

高 藤 耕 哉 (正員) 1972年5月6日生。1996年3月広島大学大学院工学研究科システム工学専攻修士課程修了。同年4月中部電力(株)入社、現在に至る。主として、電力系統の保護制御装置の開発・計画、系統安定化システムの開発・計画に従事。

佐 藤 孝 (正員) 1962年8月8日生。1983年3月長野工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月中部電力(株)入社、現在に至る。主として、電力系統の運用、系統安定化システムの開発・計画に従事。

伊 藤 久 徳 (正員) 1962年4月27日生。1985年3月東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月中部電力(株)入社、現在に至る。主として、電力系統の保護制御装置の開発・計画、系統安定化システムの開発・計画に従事。1996年電気学会進歩賞受賞。

香 田 勲 (正員) 1945年4月22日生。1964年4月中部電力(株)入社。2003年(株)中電シーティーアイ出向、現在に至る。主として、電力系統の保護制御装置の開発、保守、系統解析に従事。

幅 敏 明 (非会員) 1936年10月20日生。1955年4月中部電力(株)入社。1993年(株)中電シーティーアイ出向。2008年同社退社。主として、給電業務、自動給電システムの開発業務、系統解析業務、関連ソフト開発業務に従事。1974年電気学会論文賞, 1983年電気学会進歩賞受賞。

佐 竹 厚 志 (正員) 1978年6月15日生。2003年3月中部大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)中電シーティーアイに入社、現在に至る。主として、系統解析業務に従事。

萩 森 英 一 (正員) 1940年1月2日生。1962年3月東京工業大学理工学部卒業。同年4月(株)東芝入社。1991年東京工業大学客員教授。1998年九州工業大学教授。2004年中央大学兼任講師、現在に至る。工学博士。主として、空気遮断器、ガス遮断器開発設計に従事。IEC-SC17A-WG1, WG10, WG21, MT36 メンバーにて交流遮断器規格制定・改訂に従事。