

配電設備における異常電圧の  
検出と抑制に関する研究

2006 年

原 英喜

# 目次

第1章 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 配電設備における電力品質	2
1.2.1 低圧開閉器接点の接触不良による異常電圧の発生	3
1.2.2 過剰なコンデンサ投入による電圧の上昇	4
1.3 本研究の目的と内容	5
1.4 結言	7
第1章 参考文献	8
第2章 低圧開閉器の接触不良と負荷電流の実態	9
2.1 緒言	9
2.2 接触不良と負荷設備へ与える影響	10
2.2.1 接触不良とその種類	10
2.2.2 接触不良による負荷機器への影響	12
2.3 一般家庭における接触抵抗と負荷電流の実態調査	13
2.3.1 調査概要	13
2.3.2 接触抵抗の調査結果	14
2.3.3 負荷電流の調査結果	16
2.4 結言	21
第2章 参考文献	22
第3章 超音波を用いた接触不良検出の提案と有効性の検証	23
3.1 緒言	23
3.2 超音波による接触不良検出	24
3.3 モデル開閉器接点による有効性の検討	27
3.3.1 実験概要	27
3.3.2 実験結果と考察	30
3.3.3 30A 領域における超音波法の有効性	35
3.4 市販開閉器による有効性の検討	37

3.4.1	実験概要	37
3.4.2	実験結果と考察	39
3.5	結言	44
第3章	参考文献	45
第4章	ダイオード転流回路を用いた接触不良検出の 実用性の検証と異常電圧印加防止	46
4.1	緒言	46
4.2	ダイオード転流回路による接触不良検出	47
4.3	接触不良検出の実用性の実験的検証	48
4.3.1	実験概要	48
4.3.2	実験結果と考察	50
4.4	ダイオード転流回路と漏電遮断器を組合せた接触不良検出	52
4.4.1	検出原理	52
4.4.2	有効性の検証	53
4.4.3	超音波印加における接触不良検出	54
4.5	ダイオード転流回路による異常電圧印加防止	56
4.5.1	印加防止の原理	56
4.5.2	有効性の検証	56
4.5.3	中性線欠相保護付き漏電遮断器との比較	57
4.6	超音波とダイオード転流回路を組合せた接触不良検出	58
4.6.1	両手法の評価	58
4.6.2	検出フロー	59
4.7	結言	63
第4章	参考文献	64
第5章	高調波重畳による電源端からの接触不良検出	65
5.1	緒言	65
5.2	接触不良と高調波の発生	66
5.2.1	実験概要	66
5.2.2	実験結果	67
5.3	高調波重畳による接触不良検出	69

5.3.1	電源端からの高調波重畳実験	69
5.3.2	考察とインピーダンス等価回路	71
5.3.3	接触不良判別の可能性	72
5.4	結言	72
第5章	参考文献	74
第6章	高圧需要家における進相コンデンサ容量の 適正化と電圧上昇の抑制	75
6.1	緒言	75
6.2	進相コンデンサ設備の実態調査	76
6.2.1	コンデンサ容量の実態	76
6.2.2	自動力率調整装置導入の実態	77
6.3	高圧需要家の力率の実態と適正なコンデンサ容量	82
6.3.1	負荷力率の実態	82
6.3.2	適正なコンデンサ容量	85
6.4	力率改善による電圧上昇の抑制	87
6.5	結言	91
第6章	参考文献	92
第7章	結論	93
7.1	本論文で得られた成果	93
7.2	今後の課題と将来展望	97
	謝辞	100
	研究業績	101

# 第1章

## 序論

### 1.1 緒言

電力は社会生活をする上で重要なインフラの一つであり、情報技術(IT)が発達した今日では、良質な電力の供給がよりいっそう求められている。とくに2000年の電力の部分的な自由化以来、地域外の電力会社からも電力の購入が可能になったことから、特定規模電力事業者(PPS)の発電設備が増加・連系されることによる電力系統の品質低下が懸念され、電力を供給および購入する側にとって電力品質はますます重要視されている。

一般に電力品質とは電圧の大きさと周波数が一定で、かつ正弦波の電力を高い信頼度で供給することで、発電所や超高压送電線などの上位系統側と、6,600V、100/200Vなどの配電系統側とでは供給システムや事故様相が異なっている。

上位系統の超高压側では、発電機、変圧器、遮断器、特別高压需要家設備など大規模で極めて複雑なシステムを構成している。そのため、雷などの自然現象による故障や、電気現象に起因する運用上の問題が電力品質に支障をきたすことがある。例えば、発電所の有効電力と需要家で消費される電力が釣り合わないと、周波数が変動したり、系統各地点の無効電力のバランスが取れていないと電圧が変動したりする。また、落雷などによる故障やそれに伴う急激で短時間の需給アンバランスは、電圧や周波数の急変の引き金となり、瞬時に系統全体に波及し、系統全体の停電につながる恐れもある。さらに、多数の発電機が接続されている広域連系系統では、発電機の同期を保ちながら送電を行わなければならない安定度の維持の問題など、上位系統ではシステムの運用上の課題が多い。

一方、配電系統においては、配電用変圧器、6.6kV 高压配電線、柱上変圧器、高压需要家設備、低压需要家設備などの身近な機器・設備で構成されている。そのため、鳥獣接触や落雷による停電、設備の劣化や故障による停電波及事故などが生じることがある。また、近年ではガスタービン発電機を用いたコージェネレーションシステムや風力発電、太陽光発電など自然エネルギーを利用した分散型電源も増加傾向にある<sup>(1)(2)</sup>。それにより電力は下位から上位へ潮流することもあり、配電系統はますます複雑になりつつある。このような系統

で事故・故障が起きると配電線のループ切替や最閉路，分散型電源の連系などにより，電圧や周波数が不安定になる恐れがある。このように配電システムの電力品質の維持には，系統全体の運用の他に配電設備の事故・故障という大きな課題がある。

配電設備は高圧の配電線路と需要家設備側に大きく分けられ，配電線路における事故・故障の主な原因には，鳥獣や他物の接触，落雷による停電，線路抵抗による電圧降下および昼夜の使用電力差<sup>③</sup>と過剰な進相コンデンサ投入による電圧上昇などがある。一方，高圧需要家設備では，変電設備の劣化や鳥獣接触による地絡・短絡故障が最も多く<sup>④</sup>，配電線への波及事故になる可能性があり，周辺の高圧需要家や一般家庭へ被害が及ぶ。また，低圧需要家においては，機器の漏電や電線のショートによる停電，漏電遮断器など開閉器接点の接触不良による異常電圧の発生などがある。このように配電設備の事故・故障原因には，自然災害によるものと設備の保守・管理不備によるものがあり，設備の定期的な点検・管理によりその被害は最小限に抑えられる。

需要家設備の点検は電気事業法に基づき電気保安協会などが行っており，その軒数は，例えば中部電力管内では，低圧需要家で約 980 万軒<sup>⑤</sup>，高圧需要家においては約 10 万軒<sup>⑥</sup>にも及ぶ。そのため点検頻度は，低圧需要家については 4 年に 1 回，高圧需要家設備については月 1 回の目視点検，年 1 回の精密点検と限られることとなり，毎回の点検は重要視されている。

以上のように，電力系統における電力の品質と安定供給には様々な運用上の技術課題とコストの低減化，そして定期的な点検による予防保全が同時に求められる。とくに配電系統には，低圧の一般家庭から高圧の工場・ビルに至るまで多種多様な需要設備があり，安定した電力品質を維持するための設備の保守・管理は重要である。そのため，定期点検時において，設備の異常個所を効率よく安全・確実に発見し，設備を適正に維持・管理していくことが必要である。

## 1.2 配電設備における電力品質

配電系統は高圧配電線路を通して高圧需要家や低圧需要家設備に電力を供給しており，電力品質の低下は需要家設備に直接影響を与える。配電設備における電力品質の劣化の要因としては，電圧の変動が主であり，長期あるいは瞬時の電圧変動，遮断器の開閉サージなどの異常電圧は，需要家設備の停止または誤動作の原因となる恐れがある。とくに電圧が上昇する現象は，負荷機器の寿命低下や焼損に影響を与えかねない。

電圧上昇の発生要因には，雷サージなど自然現象によるものと点検時の事故や管理上の不具合など設備の保守・管理によるものがある。とくに後者が起因とする電圧上昇は，保守・

管理方法の改善により予防保全は可能である。この設備の点検時に起きる事象に、低圧開閉器接点の接触不良による異常電圧の発生、管理の不具合により起きる事象として、過剰な進相コンデンサ投入による電圧上昇がある。

### 1.2.1 低圧開閉器接点の接触不良による異常電圧の発生

一般家庭や商店などには、100V あるいは 200V の低電圧で電気が供給されており、4 年に 1 回の定期点検においてその安全性を確認している。通常、定期点検を行う際は、漏電遮断器や配線用遮断器など(以下、開閉器という)を開放操作し電源から切り離す。ところが、開閉器接点に部分腐食があったり、図 1-1 のように接点間に塵埃が付着したりすると<sup>(7)</sup>、開閉前に辛うじて導通状態にあっても、開閉器再投入時に接触不良となることがある。とくに単相 3 線式開閉器の中性線が接触不良を起こすと、負荷のバランス状態によっては負荷機器に通常より高い異常な電圧が加わり機器を損傷させる恐れがある。図 1-2 に単相 3 線式開閉器の中性線接点が接触不良を起こした場合の機器への過電圧印加の様子を示す。この例は中性線(N 相)接点が不導通を起こしたもので、インピーダンスの高いテレビ側の電圧は 133V の過電圧となる。

このため接触不良の疑いがある開閉器は、停電して蓋を開けて点検することになっている。ところが、近年、一般家庭においても情報通信網が整備され、容易に停電が出来ない状況にある。さらに開閉器の設置台数も多いことから、定期点検時に開閉器の蓋を開けて

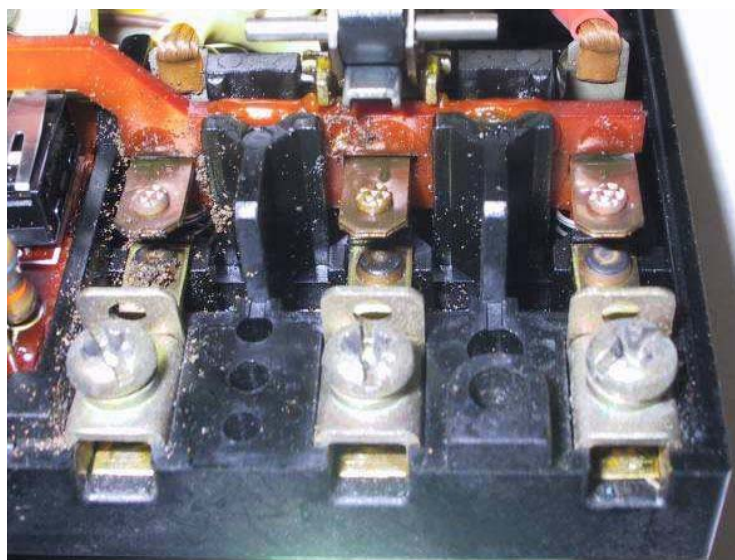


図 1-1 接点部分に付着した大量の塵埃

Fig.1-1 A lot of dirt adhering to contact point

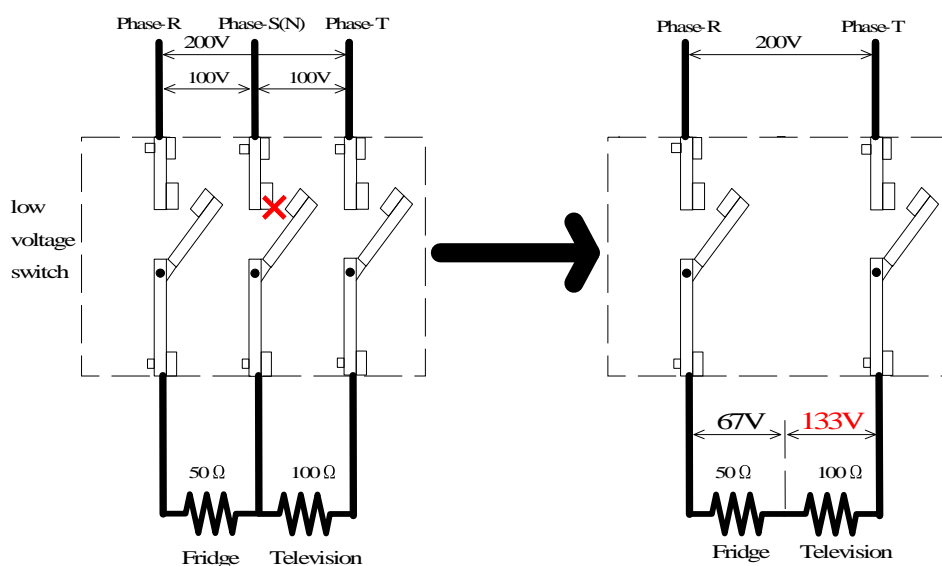


図 1-2 接触不良による負荷機器への異常電圧の印加

Fig.1-2 Application of abnormal voltage to load apparatus by poor contact

点検することは作業性が極めて悪い。そこで作業性を損なわず、かつ停電操作を伴わずに接触不良を発見する技術開発への期待は高い。

### 1.2.2 過剰なコンデンサ投入による電圧の上昇

6,600V の高圧配電線路においては、線路抵抗による電圧降下や昼夜の使用電力差<sup>(3)</sup>、軽負荷時のフェランチ効果などにより、送電端と需要家受電端では線路電圧に変動が生じている。とくに軽負荷時のフェランチ効果は配電線の電圧が上昇するため、負荷機器に過電圧を与える恐れがあり深刻な問題となっている。

フェランチ効果とは過度の進み電流によって発生する現象で、需要家に設置される進相コンデンサの容量と設置方法が要因となって生じることがある。高圧需要家の進相コンデンサは図 1-3 に示すように力率改善用として設置されており、その容量は三相変圧器容量の 3 分の 1 程度とされている。この「3 分の 1」の根拠は、「負荷力率 85%を 95%に改善するために必要な容量」と言われている<sup>(8)</sup>。ところが、今日の Hf 蛍光ランプや正弦波 PWM コンバータ<sup>(9)-(10)</sup>などに見られるデジタル機器の力率は 100%に近い。また、需要家の負荷力率は 90%以上という報告もあり<sup>(11)</sup>、そのような場合、元来のいわゆる「3 分の 1」ルールをそのまま適用するとコンデンサ容量が大き過ぎることになる。それに加えて、大部分の需要家では進相コンデンサは配電線に接続したままになっており、夜間・休日などの軽負荷時間





図 1-3 受電設備に設置される変圧器と進相コンデンサ

Fig.1-3 Transformer and static capacity installed in power receiving equipment

帯では、配電線路は進相となっているケースが多い。このような状況から、これら時間帯では、フェランチ効果により受電電圧が上昇する傾向にあり、末端になるほどその影響は大きい。

電力会社では変圧器タップ切換などによる電圧の常時補償を行っているが、系統によっては補償能力の限界に達する例もある。とくに電圧上昇を抑制させるための過補償は、逆に変電所送り出し電圧の低下を招き近接の需要家に影響が出ることから、配電線の進相特性について抜本的な対策が求められている。

### 1.3 本研究の目的と内容

本研究では、配電設備における電力品質の中で、設備の保守・管理の不備により需要家設備に影響を与える異常電圧に着目し、低圧開閉器接点の接触不良の検出と異常電圧の抑制方法、配電系統の過剰な進相コンデンサの実態とその対策について検討する。

低圧開閉器接点の接触不良により発生する異常電圧については、超音波とダイオード転流回路を用いた接触不良検出法の提案とその有効性、異常電圧の印加防止法について検討

する。また、低圧電路電源端からの接触不良個所の検出についてその手法を提案する。さらに、高圧配電線における過剰な進相コンデンサによる電圧上昇については、需要家設備のコンデンサ容量と自動力率調整装置導入の調査および力率の実測結果から、負荷力率の推定、適正なコンデンサ容量を求め、力率改善時の電圧上昇の影響評価を行う。本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章では、低圧開閉器接点の接触不良の種類と負荷設備へ与える影響、そして開閉器の接触抵抗と負荷電流の実態調査結果について述べる。とくに低圧開閉器の接触抵抗と負荷電流については、一般家庭 54 軒に実際に訪問し、単相 3 線式開閉器の接触抵抗と負荷電流を測定し、その実態を明らかにした。また、開閉器の入り切り操作回数を変えた場合の接触抵抗への影響についても述べる。さらに、接触不良の原因の一つである発錆について、単相 3 線式回路の負荷電流を測定し発錆環境の発熱量について報告する。

第 3 章では、超音波を用いた低圧開閉器の接触不良検出法の提案と実験による超音波法の有効性の検証について述べる。この超音波を用いた手法は、接触抵抗の低い辛うじて導通している接触不良接点を通電状態で検出する手法である。検証実験はモデル開閉器接点と市販開閉器により超音波法の有効性を検証する。モデル開閉器接点による実験では、様々な試料で接触不良を模擬させた接点に数 A から 30A までの電流を通電させ、それぞれの試料における検出の有効性とその現象、超音波出力との関係について検証を行う。市販開閉器における実験では 200A クラスまでの各種開閉器で、超音波法の有効性と接点圧力、超音波出力との関係について検証結果を述べる。

第 4 章では、ダイオード転流回路を用いた開閉器接点の接触不良検出法の提案と実用化に向けた検証について述べる。このダイオード転流回路は、開閉器操作直後の接触不良を検出し、その間に発生する異常電圧の印加を防止する利点も有する。検出は開閉器一次・二次側にダイオード転流回路を接続し、ダイオード両端の電圧波形の形状から接触不良を検出する。検証実験は 3kW までの実負荷で行い、ダイオード転流回路による検出の実用性と検出可能な接触抵抗の検討を行う。さらに、接触不良によって発生する異常電圧の印加を防止する手法と、漏電遮断器との組合せによる接触不良検出法についても検証結果を述べる。

第 5 章では、低圧電路電源端からの接触不良検出の可能性について、実験結果を基に検討する。文献などによると開閉器端子などが接触不良を起こすと、接触不良個所の電圧波形は歪波形となり高調波成分が発生している<sup>(12)・(13)</sup>。この高調波成分は小さいため、電源端からの測定では接触不良を検出できない。そこで、電源端から高調波を重畳させて高調波インピーダンスの変動傾向から接触不良を検出する手法を述べる。

第 6 章では、配電線路における異常電圧の一つである過剰な進相コンデンサによる電圧上昇について述べる。高圧需要家に設置される力率改善用の進相コンデンサは、そのほとんどが配電線に接続したままの状態であり、夜間などの軽負荷時間帯ではフェランチ効果により電圧が上昇する現象が生じている<sup>(14)</sup>。本章では、進相コンデンサ設備の実態調査と需要家力率の測定、力率改善時の配電線電圧の影響評価を行う。実態調査は高圧需要家内の進相コンデンサ容量と自動力率調整装置の導入状況、力率測定は需要家受電点においてそれぞれ行い、その結果を基に負荷力率の推定、適正なコンデンサ容量の提案を行う。さらに自動力率調整装置導入により力率改善した場合の電圧上昇の影響評価を行う。

第 7 章では、本論文で得られた成果と今後の課題と将来展望について述べる。

#### 1.4 結言

本章では、電力系統における電力品質について、上位系統と配電系統側それぞれの現状と課題、配電設備で発生する二つの異常電圧の事象について述べた。そして本論文の目的として、配電設備の電力品質の中で設備の保守・管理により需要家設備に影響を与える異常電圧に着目し、低圧開閉器接点の接触不良検出と異常電圧の抑制方法、配電系統の過剰な進相コンデンサの実態とその対策について述べる。

## 第1章 参考文献

- (1) 太陽光発電協会：“将来予測”，太陽光発電協会 HP, <http://www.jpea.gr.jp> (2004)
- (2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：“日本における風力発電量の推移”，新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)HP, <http://www.nedo.go.jp> (2005)
- (3) 電気事業連合会：“真夏の1日の電気の使われ方の推移”，電気事業連合会 HP, <http://www.fepc.or.jp> (2005)
- (4) 中部電気保安協会：“電気事故・故障”，(財)中部電気保安協会, pp.42-43 (1999)
- (5) 中部電気保安協会：“協会のご案内”，(財)中部電気保安協会広報誌, pp.9 (2003)
- (6) 萩原貴久：“平成15年度の保安業務を振り返って/生産と電気1月号内”，(社)日本電気協会, pp.24-25 (2004)
- (7) 前田信吾, 渋川弘一, 穴村隆志：“劣化診断技術3 配線用遮断器・電磁開閉器”，電気設備学会誌, Vol.13, No.12, pp.37-40 (1993)
- (8) 日本電設工業会：“新編・新人教育電気設備増補版”，オーム社, pp.178 (1987)
- (9) 岩崎電気：“ライティング講座”，岩崎電気(株)HP, <http://www.iwasaki.co.jp>
- (10) 日本リライアンス：“情報誌バックアップ”，日本リライアンス(株)HP, Vol.004, <http://www.reliance-electric.co.jp>
- (11) 電気設備学会中部支部：“エネルギー設備の使用実態を踏まえた分散型電源導入時の影響評価に関する調査研究報告書”，(社)電気設備学会中部支部, pp.60 (2004)
- (12) 愛知久史, 佐土根範次, 松村年郎, 鬼頭幸生, 向山翼, 高木勲：“SF6分解生成物が介在した銅点接触子の交流電流通電特性に関する実験的考察”，電気学会論文誌B, 111巻5号, pp.562-569 (1991)
- (13) 松井彰：“低圧電路および開閉器接触不良検出法に関する研究”，名古屋工業大学修士論文, pp.43-63 (2005)
- (14) 山田琢寛：“高圧受電設備における力率の実態と進相コンデンサ容量”，(社)電気設備学会誌, Vol.25, No.10, pp.788 - 791 (2005)

## 第 2 章

# 低圧開閉器の接触不良と負荷電流の実態

### 2.1 緒言

低圧需要家設備の異常電圧の発生は、漏電遮断器などを開閉操作した場合、接点の接触不良により生じることが多い。一般家庭の開閉器は、動作頻度も少なく長い期間、閉(ON)の状態に置かれることが多い。そのため、開閉器接点には塵埃が付着したり<sup>(1)</sup>、発錆などの部分腐食が生じたりして、過電流での遮断や定期点検での開放時に塵埃などが接点間に挟まり、接触不良に至ることがある。この接触不良の要因には、屋外からの雑草の種や砂塵、住宅壁材などの侵入や湿気の侵入による発錆などがある。とくに単相 3 線式開閉器では、負荷機器が  $L_1$ -N 相、N- $L_2$  相にバランスよく使用されていると、中性線の発熱量は小さいと予想され、発錆しやすい環境下にある。このように接触不良は様々な要因により発生しその種類や状態が異なることから、テスターなどで発見できない抵抗値の低い接触不良状態から不導通のように抵抗値の高い状態まで様々である。

上述の通り、低圧開閉器の接触不良は塵埃などが付着し開閉操作時に起きることが多く、抵抗値によっては負荷設備に与える影響も大きいことから、その状況に合った検査方法が求められる。とくに開閉器の接点は、構造上、通電状態で点検することはできず、その都度、停電して蓋を開けて点検するのは作業性が悪いことから、作業性を損なわず確実に接触不良を検出する診断装置の開発が必要である。そのため低圧開閉器の接触抵抗の実態や負荷の使用状況を調査・把握することは、研究開発の基礎データとなり必要不可欠なことである。

本章では、低圧開閉器接点の接触不良の種類と負荷設備へ与える影響、そして開閉器の接触抵抗と負荷電流の実態調査について述べる。とくに低圧開閉器の接触抵抗と負荷電流については、一般家庭 54 軒に実際に訪問し、単相 3 線式開閉器の接触抵抗と負荷電流を測定し、その実態を明らかにする。また、開閉器の入り切り操作回数を変えた場合の接触抵抗への影響についても述べる。さらに、接触不良の原因の一つである発錆について、単相 3 線式回路の負荷電流を測定し発錆環境の発熱量について報告する。

## 2.2 接触不良と負荷設備へ与える影響

### 2.2.1 接触不良とその種類

#### (1) 接触不良の発生

接触不良が生じた開閉器接点の近傍には塵埃の付着や発錆などが見られる。塵埃には図 2-1 に示すように屋外からの雑草の種や砂塵、住宅壁材の侵入などがある。また、接点の発錆については湿気の侵入と温度によって生じることがある。この温度はそこを流れる電流による発熱によって大きく異なってくる。とくに単相 3 線式においては、負荷機器が L<sub>1</sub>-N 相、N-L<sub>2</sub> 相にバランスよく使用されていると、中性線電流はほぼ零となり、そのジュール熱もほぼ零となることから、中性線接点には電圧線より湿気が残りやすく、図 2-2 に示す通り発錆しやすい環境にある。

開閉器接点の接触不良はこれら塵埃や発錆などが接点間に挟まり、抵抗値が通常よりも高いまたは導通していない状態を呼んでいる。

#### (2) 接触不良の種類

接点の接触不良状態を大きく分けると抵抗値が低い状態と不導通のような抵抗値が高い状態に分けられる。



図 2-1 接触不良開閉器の内部にあった塵埃

Fig.2-1 A lot of dusts inside switch at poor contact



図 2-2 中性線が発錆した状態

Fig.2-2 Rusty state of neutral line

①抵抗値が低い状態

接点間に塵埃などが挟まり接触不良状態であっても、接点間の塵埃の状態や開閉操作により接触抵抗値が低く、一見導通している状態(以下、辛うじて導通しているという)を言い、この場合、テスターなどでは発見できない。

②抵抗値が高い状態

開閉器を投入操作した際、接点間に塵埃などが挟まり、抵抗値が高いまたは不導通の状態を言う。この場合、負荷機器には 100V などの定格電圧を超える高い電圧を印加させる恐れがあり、すぐに開放(OFF)しなければならない。

表 2-1 に辛うじて導通している開閉器接点の接触抵抗の一例を示す。この開閉器は図 1-1 に示すように  $L_2$  相に大量の塵埃が付着し、接触不良状態の開閉器である。表より  $L_2$  相の接触抵抗値は測定毎に異なり、場合によっては抵抗値が低く接触不良を見つけられないことがある。

表2-1 辛うじて導通している開閉器の接触抵抗値

Table 2-1 Contact resistance of barely conducting switch

単位：[mΩ]

測定回数	L <sub>1</sub> 相	N相	L <sub>2</sub> 相
1回目	6.43	46.23	327.21
2回目	6.26	64.85	111.40
3回目	5.42	40.58	31.34

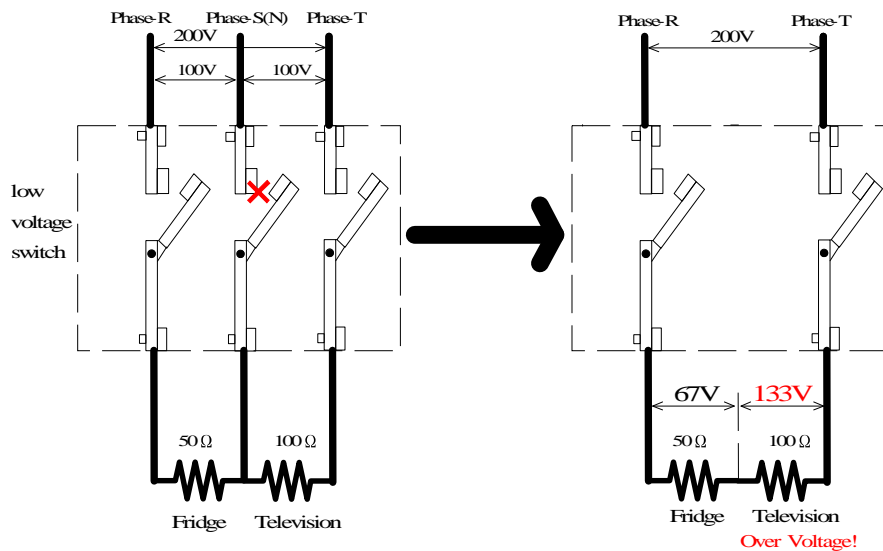


図 2-3 中性線接触不良による過電圧の印加

Fig.2-3 Application of over voltage by poor contact

## 2.2.2 接触不良による負荷機器への影響

### (1) 単相 3 線式の場合

単相 3 線式は一般家庭で最も多く採用されている配電方式である。この方式で中性線が接触不良を起こすと、図 2-3 に示すように接触抵抗による電圧降下分が負荷抵抗の高い方に加算され、負荷機器には 100V を超える電圧が印加され、機器が焼損する恐れがある。



## (2) 三相 3 線式の場合

三相 3 線式は空調機やモーターなど工場やオフィスビルで多く採用されている。この方式で、例えば運転中のモーター回路の一相が接触不良(欠相)したとすると、モーターへ流入する電流は单相(2 本だけ)になる。しかし、負荷そのものは変化しないため電流は増加し過負荷状態となり、放置するとモーターは焼損する。また、逆に停止中のモーターに欠相した電源を供給するとモーターの巻線に回転磁界ができないのでいつまでも回転せず、起動中のような状態となり、これも焼損に至る恐れがある。

## 2.3 一般家庭における接触抵抗と負荷電流の実態調査<sup>(2)</sup>

### 2.3.1 調査概要

#### (1) 調査目的

開閉器接点の診断装置の開発には、接触抵抗の実態把握が必要である。しかし、一般家庭など低圧開閉器の接触抵抗の実態については、あまり報告されていない。とくに、図 2-2 に示す中性線のみが発錆し接触不良に至る原因として、そこに生じる発熱量、即ち負荷電流の大きさが考えられるが、その立証はなされていない。また、接触不良の回避方法として、一般に数回入り切り操作を行うことが言われているが、その有効性も明らかとなっていない。そこで、本節では一般家庭で使用されている開閉器を中心に接触抵抗および負荷電流の実態調査を行った。

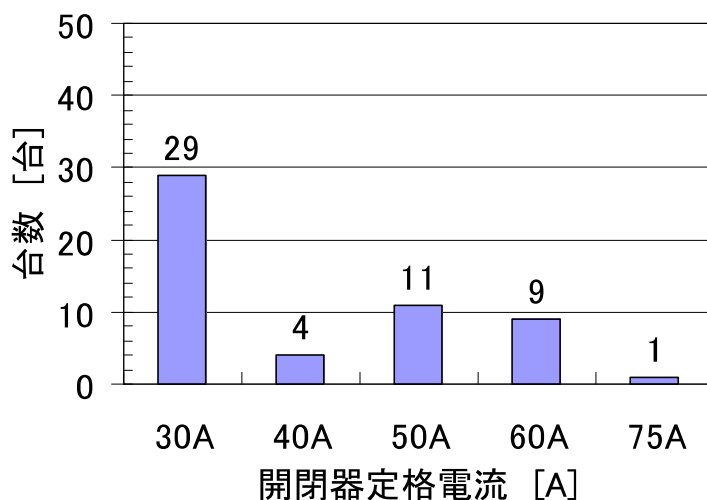


図 2-4 測定した開閉器台数

Fig.2-4 Number by switch for investigation

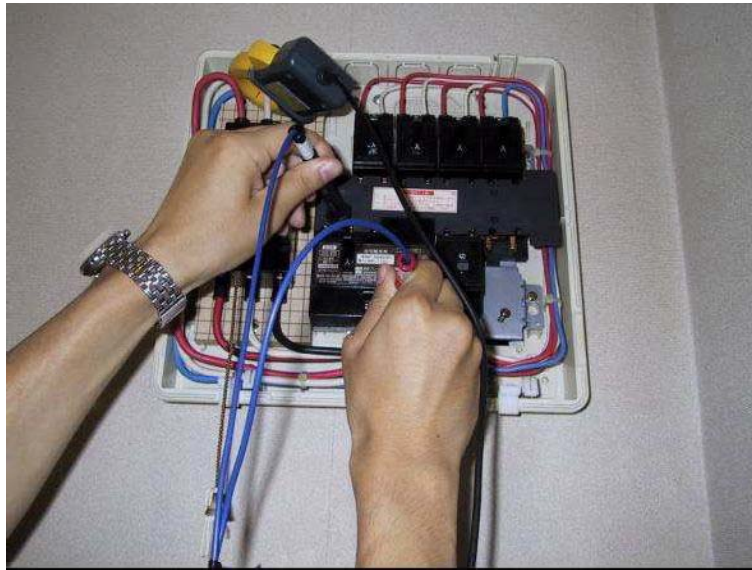


図 2-5 調査風景

Fig.2-5 Investigation scenery

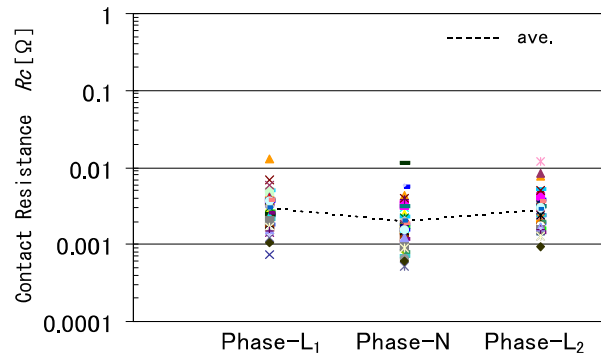
## (2) 調査方法

実態調査は一般家庭 54 軒に訪問し、開閉器各相の接触抵抗と負荷電流を測定した。さらに集合住宅の主幹開閉器においても、同様に負荷電流測定を行った。図 2-4 に今回測定した一般家庭の開閉器の定格電流別測定台数を示す。開閉器の接触抵抗は一次・二次間の電圧および相電流をデジタルレコーダに 0.1 秒程記録し算出した。測定は開閉操作前と開閉後にそれぞれ行った。なお、開閉後については、54 台の内 32 台を入り切り操作 1 回後、残り 22 台については、無負荷状態で入り切り操作 5 回行った後に測定した。図 2-5 に調査風景を示す。

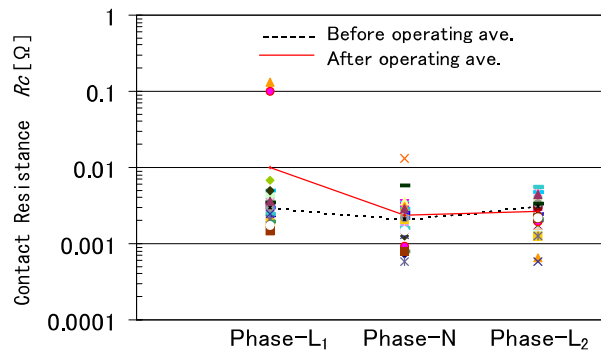
### 2.3.2 接触抵抗の調査結果

#### (1) 一般家庭の接触抵抗値

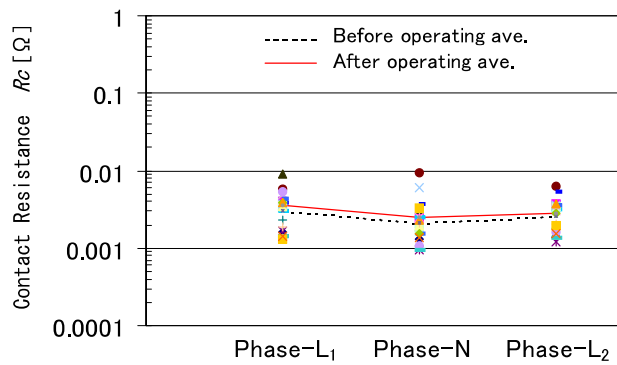
図 2-6(a)に開閉器 54 台の開閉操作前の接触抵抗値を示す。図中の破線は平均値を示す。開閉前の接触抵抗値は各相概ね  $1\sim 10\text{m}\Omega$  の範囲内であった。とくに中性線(N相)については、 $0.5\sim 10\text{m}\Omega$  と電圧線( $L_1\cdot L_2$ 相)よりも低い値を示した。これは接点の接圧に関係するもので、中性線の接圧は構造上電圧線より高いために、相対的に低い値を示したと考えられる。



(a) 入り切り操作前の接触抵抗値(54 台)



(b) 入り切り操作 1 回後の接触抵抗値(32 台)



(c) 入り切り操作 5 回後の接触抵抗値(22 台)

図 2-6 開閉操作前後の接触抵抗値(54 台)

Fig.2-6 Contact resistance at open and closed operate

表 2-2 入り切り操作回数における接触抵抗値の標準偏差

Table 2-2 Contact resistance standard deviation at open and closed

入り切り操作回数	開閉前後	L <sub>1</sub> 相	N相	L <sub>2</sub> 相
1回(32台)	前	0.00210	0.00202	0.00228
	後	0.02731	0.00220	0.00123
5回(22台)	前	0.00141	0.00121	0.00111
	後	0.00179	0.00185	0.00132

## (2) 入り切り操作回数による接触抵抗値

図 2-6(b)に入り切り操作 1 回後、同図(c)に 5 回後の接触抵抗値をそれぞれ示す。図中の破線と実線は開閉操作前と後の平均値である。表 2-2 には入り切り操作 1 回および 5 回における開閉前後の接触抵抗値の標準偏差を示す。

入り切り操作 1 回では L<sub>1</sub>相の接触抵抗値がばらついたため、平均値、標準偏差とも大きくなったが、5 回においてはばらつきが少ないため、各相に大きな差は生じなかった。この接触抵抗値のばらつきは、開閉操作後に接点接触面内に塵埃などが入り込み生じたものと予想される。一方で、開閉器の入り切り操作を重ねることは、接触面内にある塵埃などが接点の開閉運動により取り除かれることとなり、接触抵抗のばらつきは少なくなる。これはいわゆる接点の「クリーニング効果」の現れで、接触不良回避の一つの方法と言える。

### 2.3.3 負荷電流の調査結果

#### (1) 一般家庭の開閉器における負荷電流

接触抵抗の測定時に記録した 54 軒の負荷電流の内、43 軒(約 80%)の家庭が 5A 未満であった。図 2-7 に負荷電流が 5A 以上を記録した需要家 11 軒の各相電流値を示す。電流は L<sub>1</sub>・N・L<sub>2</sub>相を順次測定したため、同期は取れていないものの、L<sub>1</sub>・N 相あるいは N・L<sub>2</sub>相に偏って流れている家庭が半数以上あった。

そこで、ある家庭において負荷電流を 1 週間連続測定し、負荷設備のバランス状態を見た。その結果を図 2-8 に示す。この家庭においても負荷電流は L<sub>1</sub>・N 相に常に偏って流れている状態であった。通常、一般家庭では 100V 機器をコンセントに差込む際、負荷のバランスまで考えていないため、図のような結果になったと考えられる。

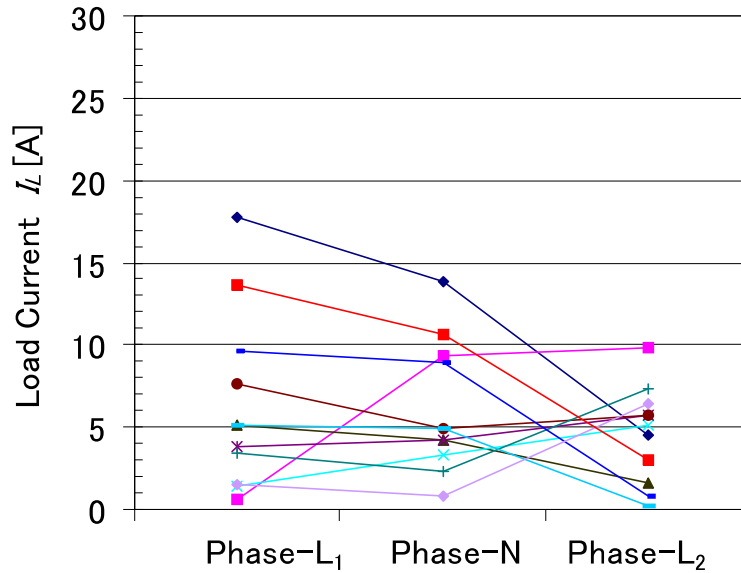


図 2-7 開閉操作前の負荷電流値(11 軒/5A 以上)

Fig.2-7 Load current of before operating switches

### (2) 集合住宅主幹開閉器における負荷電流

集合住宅の主幹開閉器には、数軒～数十軒まとまって流れているため、一般家庭の個々は図 2-8 のようにアンバランス状態であっても、集合住宅主幹開閉器ではバランスして流れていることが多い。図 2-9 に集合住宅主幹開閉器の 1 週間の負荷電流記録例を示す。集合住宅主幹開閉器においては、中性線(N相)電流は  $L_1 \cdot L_2$  両電圧線より少なく、負荷はバランスよく使用されていることが分かる。

### (3) 開閉器接点のジュール熱

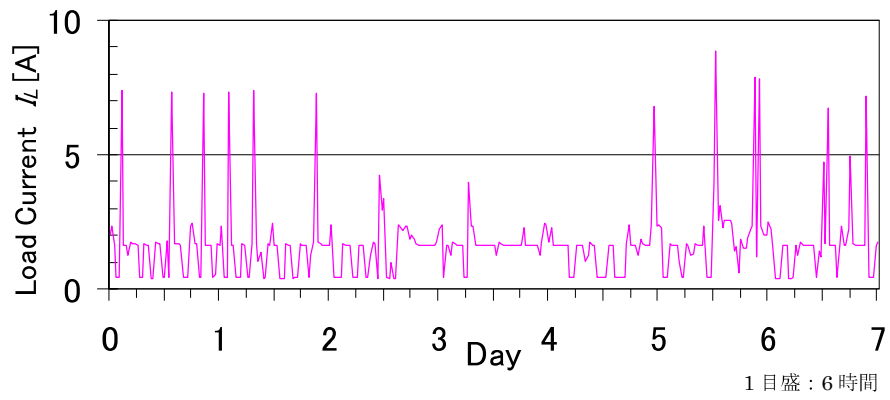
一般家庭開閉器と集合住宅主幹開閉器の接点に生じるジュール熱を、図 2-8 と図 2-9 の結果から算出した。表 2-3 にその結果を示す。一般家庭の開閉器では電流の多い  $L_1 \cdot N$  相にジュール熱は多く生じた。一方、集合住宅の主幹開閉器では、電流の多い  $L_1 \cdot L_2$  相にジュール熱は多く生じ、電流の少ない N 相接点のジュール熱は 3.62kJ と電圧線の 20 分の 1 以下であった。このように開閉器接点に生じる熱量は各相差が生じており、発熱量の少ない中性線の接点は、図 2-2 に示す開閉器のように発錆しやすい環境下にあると言える。

表 2-3 1 週間に生じた接点ジュール熱

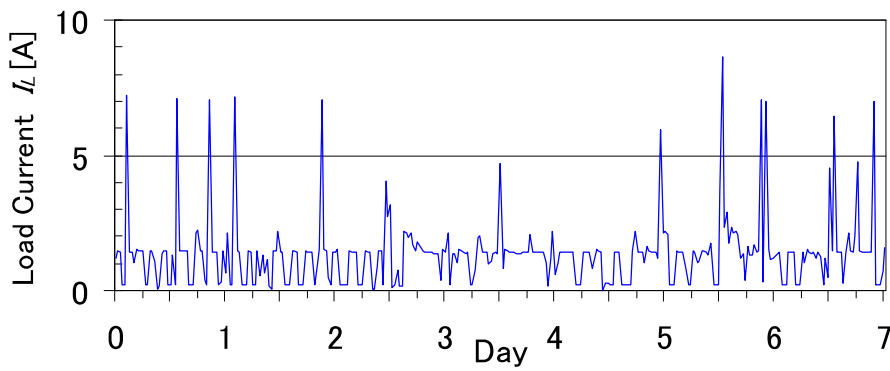
Table 2-3 Joule heat of contact point produced at a week

単位 : [kJ]

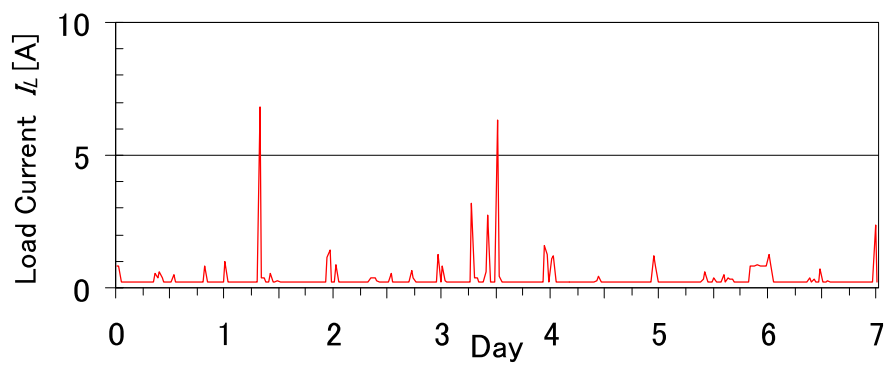
	L <sub>1</sub> 相	N相	L <sub>2</sub> 相
一般家庭開閉器	4.99	3.04	0.47
集合住宅主幹開閉器(10 軒分)	70.44	3.62	58.28



(a) L<sub>1</sub>相電流



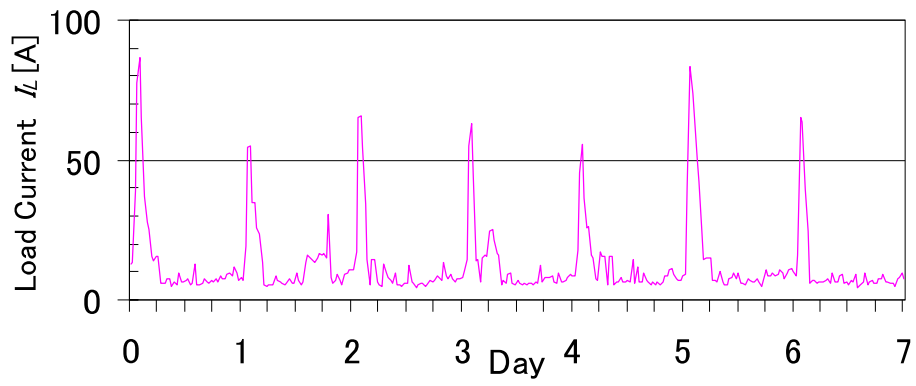
(b) N相電流



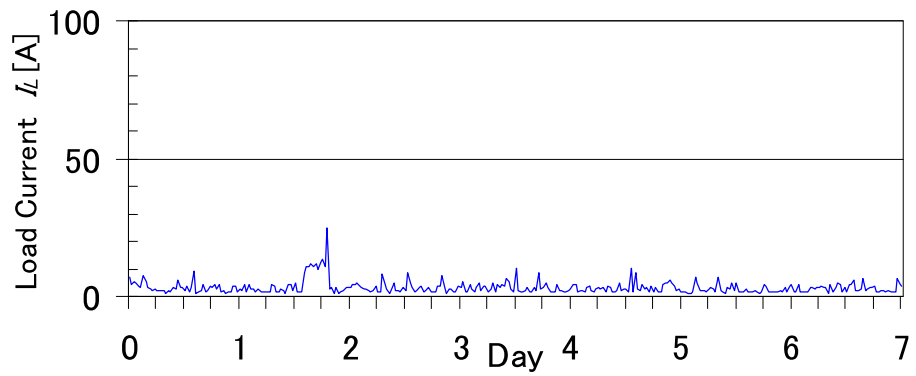
(c) L<sub>2</sub>相電流

図 2-8 一般家庭開閉器の負荷電流

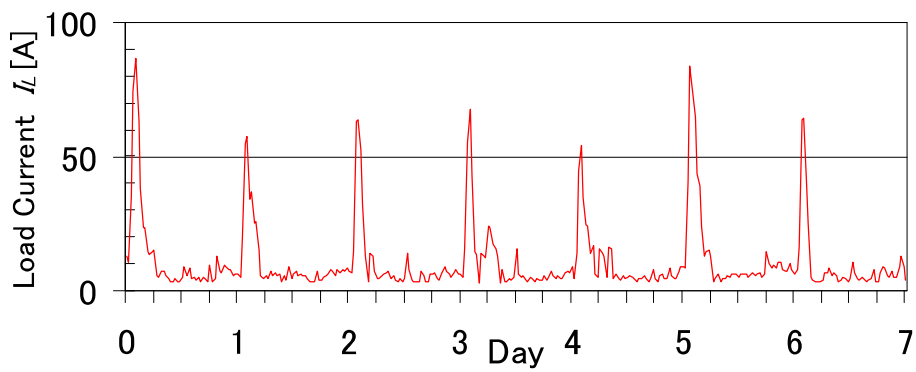
Fig.2-8 Example of load current of residential customer



(a) L<sub>1</sub>相電流



(b) N相電流



(c) L<sub>2</sub>相電流

図 2-9 集合住宅主幹開閉器の負荷電流

Fig.2-9 Example of load current of apartment



## 2.4 結言

本章では、低圧開閉器接点の接触不良の種類と負荷設備へ与える影響、そして開閉器の接触抵抗と負荷電流の実態調査結果について述べた。とくに低圧開閉器の接触抵抗については、一般家庭 54 軒に実際に訪問し、単相 3 線式開閉器の接触抵抗を測定し、その実態を明らかにした。また、接触不良の原因の一つである発錆について、単相 3 線式回路の負荷電流を測定し発錆環境の一つである発熱量について検討した。さらに、開閉器の入り切り操作回数を変えた場合の接触抵抗への影響についても報告した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 低圧開閉器接点の接触不良には、辛うじて導通している状態や不導通のような抵抗値の高い状態まである。とくに辛うじて導通している接触不良接点は、テスターなどでは発見できなため、新しい検出方法が求められている。
- (2) 一般家庭における低圧開閉器の接触抵抗の実態は約  $0.5\sim 10\text{m}\Omega$  の範囲内にあり、開閉操作により  $100\text{m}\Omega$  以上の接触不良に至る開閉器が数台あった。また、入り切り操作回数を増やすことで、接触不良の多くは回避できると言える。
- (3) 一般家庭の負荷電流の実態は、日中ではその 80% が 5A 未満であり、負荷設備のバランスは  $L_1\text{-N}$  相または  $N\text{-}L_2$  相に偏っている家庭が多かった。一方、集合住宅の主幹開閉器では、負荷電流は  $L_1\text{-N}$  相、 $N\text{-}L_2$  相にバランスよく流れており、開閉器の中性点に生じるジュール熱量は両電圧線の約 20 分の 1 以下と少なく、発錆しやすい環境にあることが明らかとなった。

低圧開閉器接点の接触不良は、本章で述べたようにテスターでは発見できない辛うじて導通している状態や、投入時に不導通となって異常電圧を発生させるものがあり、それぞれ状態にあった点検手法と防止対策が求められる。また、負荷電流の測定結果において、一般家庭の大半は 5A 未満であることから、一般家庭開閉器の接触不良診断には 5A までの負荷電流を想定して検討していくこととする。

## 第2章 参考文献

- (1) 前田信吾, 渋川弘一, 穴村隆志: “劣化診断技術3 配線用遮断器・電磁開閉器”, 電気設備学会誌, Vol.13, No.12, pp.37-40 (1993)
- (2) 原英喜, 中村光一: “一般家庭における低圧遮断器接点の接触抵抗とジュール熱”, 電気設備学会誌, Vol.21, No.12, pp.1031-1032 (2001)

## 第3章

# 超音波を用いた接触不良検出の提案と

## 有効性の検証

### 3.1 緒言

低圧開閉器の接点が接触不良を起こすと、負荷のバランス状態によっては負荷機器に過電圧などを与える恐れがある。そのため、開閉器接点に接触不良の疑いがある場合、通常は当該開閉器の電源側開閉器を開放(OFF)し、テスターなどで導通テストあるいは抵抗測定を行っている。ところが、接触不良接点の中には、塵埃などの付着状態により、接触不良でありながらも抵抗値が低い、いわゆる辛うじて導通している状態がある。この場合、テスターなどの測定では判別できないため、点検では見過ごされて来た。そこで本研究において、この辛うじて導通している接触不良接点を、20kHz を超える周波数の超音振動波により検出する手法を見出した<sup>(1)</sup>。

本章では、新しく見出した超音波を用いた低圧開閉器接点の接触不良検出の提案と、モデル開閉器接点および市販開閉器による有効性の実験的検証を行い、手法の確立を行う。

モデル開閉器接点を用いた実験は、30A クラスの銅板と接点を組み合わせたモデル開閉器接点を作製し、乾燥野草や粉末アルミナ(酸化アルミニウム)などで各種接触不良状態を模擬し、通電電流 5A と 30A 領域までの超音波法の有効性を検証した。検証では接点間に現れる電圧波形に注目し、電圧実効値とその波形パターンから接点の接触不良状態について検討した。さらに超音波出力レベルを可変し、電圧の増大との関係についても検討を行った。

市販開閉器による実験では、実際に市販されている 30~200A クラスの接点圧力の異なる開閉器を用いて、超音波法の検出有効性を検証するとともに超音波印加時の接点間電圧値の様相、超音波出力と開閉器容量の関係について検討を行った。

### 3.2 超音波による接触不良検出<sup>(1)</sup>

#### (1) 検出方法

本手法は超音波振動を開閉器の電線接続端子に直接印加し、接触抵抗の変化で検出を行う。図 3-1 に検出回路、図 3-2 に検出状況をそれぞれ示す。検出は開閉器の電源側端子 R<sub>1</sub>, S<sub>1</sub>, T<sub>1</sub> に超音波を連続してそれぞれ加え、超音波印加前と印加中の電圧・電流値から接触抵抗値を算出し、接触抵抗の変化から接触不良を判定する。

検出例を以下に示す。使用した開閉器は一般家庭で使用中に接触不良を起こした単相 3 線式漏電遮断器(3P30A)で、事前に調査を行ったところ、R 相の接点は良好、T 相は腐食状態であった。図 3-3 に R 相、T 相の超音波印加と接触抵抗の関係を示す。R 相の接点は良好なため、超音波印加の有無に拘わらず接触抵抗値は一定であった。ところが T 相の当初の抵抗値は R 相とほぼ同じ値であったが、超音波印加中は 20 倍以上に増加した。

図 3-4 に超音波印加時の端子間電圧波形を示す。R 相の電圧波形は超音波印加の有無に拘わらず変化はないが、T 相の電圧波形は 20 倍以上に増大していることが分かる。このように辛うじて導通状態にある接触不良接点は、一見良好な接点と考えられるが、超音波を加えることで接触抵抗は大きくなり電圧波形は増大するため、接触不良の検出を行うことができる。

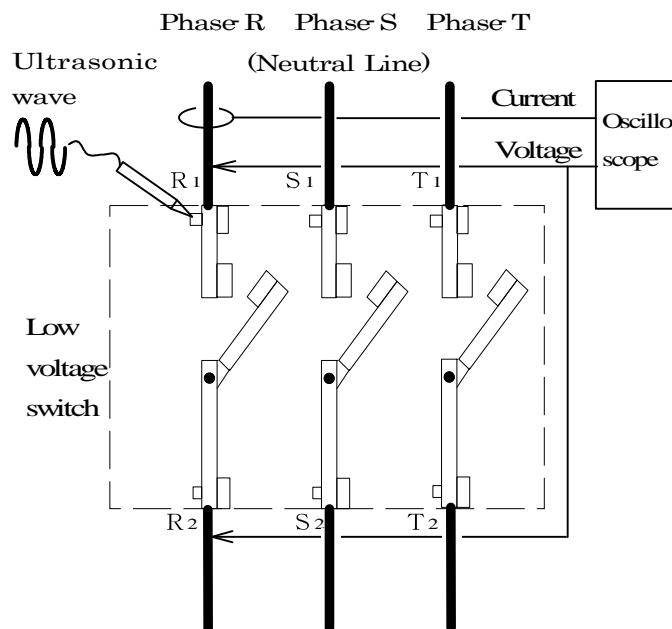


図 3-1 超音波による検出回路

Fig.3-1 Detection circuit by ultrasonic wave

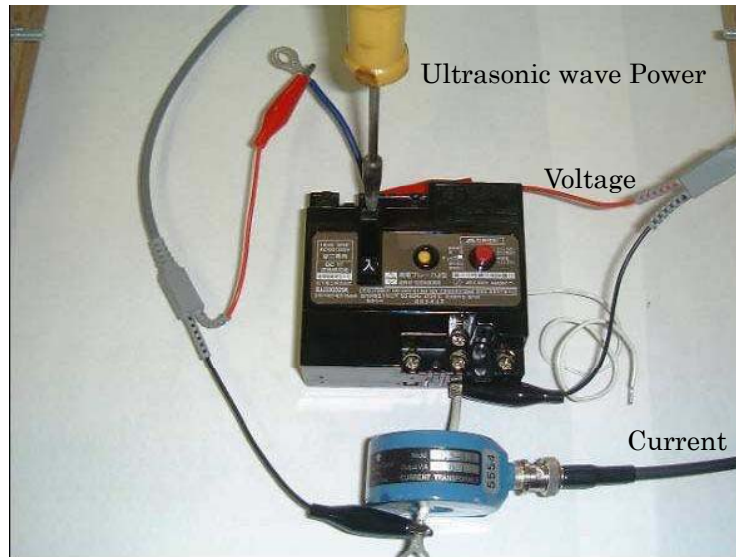


図 3-2 検出状況

Fig.3-2 Detection situation

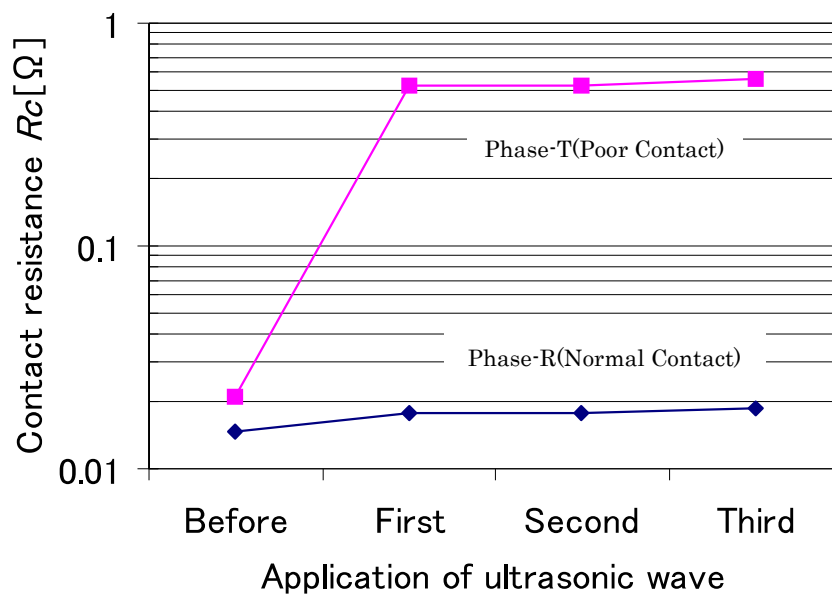


図 3-3 超音波印加と接触抵抗

Fig.3-3 Ultrasonic wave application and contact resistance

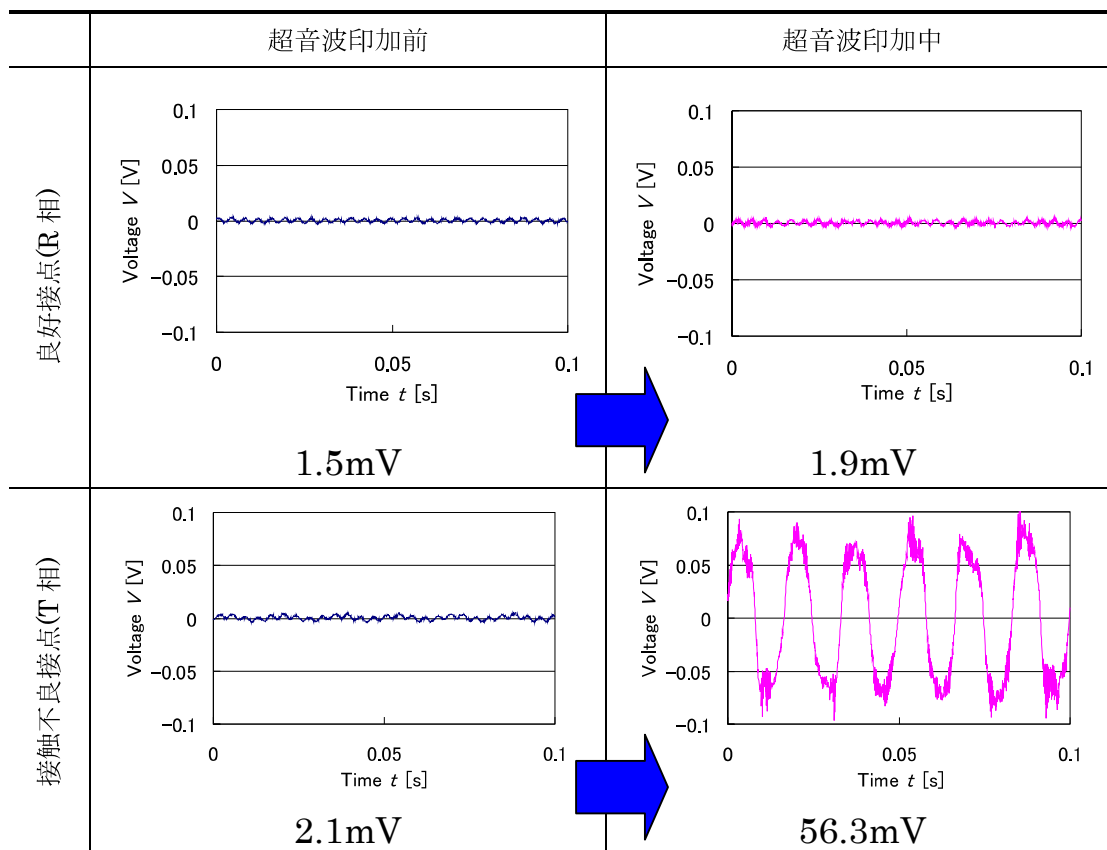


図 3-4 超音波印加時の電圧波形

Fig.3-4 Voltage waveform at application of ultrasonic wave

(2) 検出手順と特徴

検出は開閉器の電源側端子に超音波を印加し，接触抵抗の変化を見るもので，検出手順を表 3-1 に示す。

また，本手法の特徴を挙げると以下の通りである。

- 開閉器接点の接触不良を蓋を開けることなく，通電状態で検出可能である。
- テスターでは発見できない，辛うじて導通している接触不良接点を検出できる。

表 3-1 検出手順

Table 3-1 Detection procedure

手 順	内 容
手順 1	開閉器の一次・二次間の電圧，電流を測定しながら，電源側端子に超音波振動を加える。
手順 2	超音波印加前および印加中の電圧・電流値から接触抵抗値を求める。
手順 3	両者抵抗値を比較し，顕著な変化があるものは接触不良と判定する。
手順 4	もし，接触抵抗値に変化がある場合は，接点が接触不良の疑いがあるため，開閉器を開放し内部点検を行う。

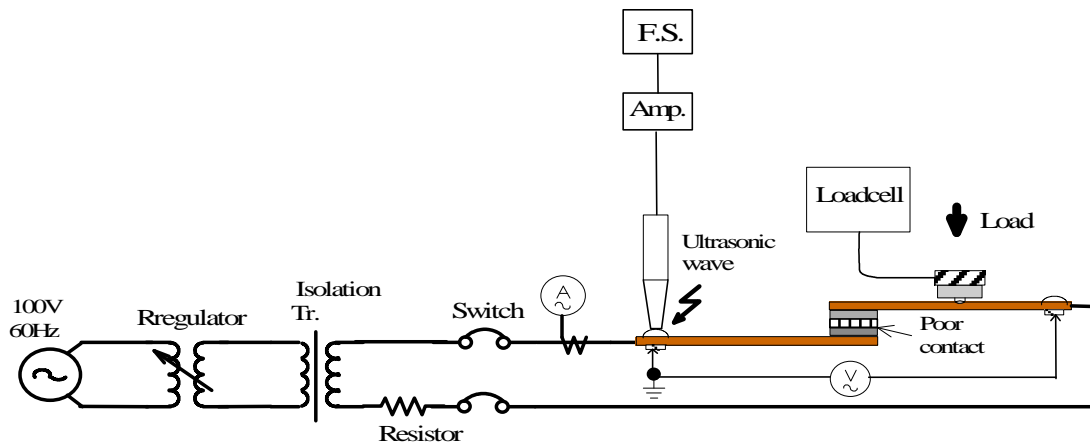


図 3-5 実験回路

Fig.3-5 Experiment circuit

### 3.3 モデル開閉器接点による有効性の検討

#### 3.3.1 実験概要

##### (1) 実験回路

図 3-5 にモデル開閉器接点を用いた 5A までの実験回路，表 3-2 に使用測定器の仕様をそれぞれ示す。図の左側が電源回路，右側がモデル開閉器接点，中央上部に超音波発生回路である。

電流値の設定はレギュレータの二次電圧が約 100V となるような抵抗器(白熱電球)を挿入

した。なお、電流の上限値については、一般家庭の日中の負荷電流は大半が 5A 以下であり  
 ②、点検による開閉操作は日中が多いことから 5A とした。

超音波は発振器(F.S.)から、28kHz の信号を発生させ、電力増幅器(Amp.)を通して超音波振動子に入力した。そして約 30N の荷重で電源側電線接続端子に当て超音波振動を加えた。なお、超音波振動子に入力できる最大電力は、電力増幅器の性能から数 W である。

## (2) 作製したモデル開閉器接点

表 3-3 に作製したモデル開閉器接点の仕様、図 3-6 に写真をそれぞれ示す。接点材料は 30A 以下の開閉器に多く採用されている銀合金とした。可動接触子、固定接触子のサイズはそれぞれ一般家庭で多く使われている単相 3 線式漏電遮断器に相当するよう作製した。接点への荷重は、接点端に約 3N が掛かるよう可動接触子中央に 6N の荷重を加えた。

表 3-2 使用測定器仕様

Table 3-2 Specification of measuring instrument

名 称	型 式	定 格	製造者	備 考
発振器(F.S.)	1946	2ch, 0-15MHz	エヌエフ回路設計ブロック	
高速電力増幅器(Amp.)	4520, 4521	2.5kVA, 33.3A	エヌエフ回路設計ブロック	ブースター含む
超音波振動子	ホルト縮径ソノトロン	150W, 28kHz	本多電子(株)	ボア径先φ5.8mm
荷重変換器	MRD-20N	0-20N	(株)昭和測器	指示計 DS-3100
デジタルオシロスコープ	WE7111	4ch, 100MS/s	横河電機(株)	
絶縁変圧器	ST-500A	120V, 500VA	(株)菅野電機研究所	
レギュレータ	RSA-5	100V, 500VA	東京理工(株)	

表 3-3 モデル開閉器接点仕様

Table 3-3 Specifications of a model contact

名 称	材 質	サイズ[mm]
接点	銀合金	接点径φ4.5
可動接触子	りん青銅	40×6×(0.25×2)
固定接触子	銅	30×6×1.2



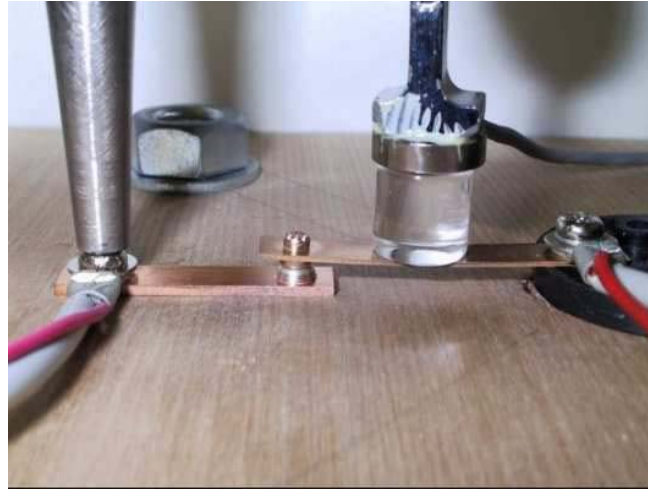


図 3-6 モデル開閉器接点

Fig.3-6 Model contact

表 3-4 接触不良を模擬した試料

Table 3-4 Samples of making poor contact

名 称	性 状	特 徴
乾燥野草	乳鉢で十分粉碎	外から浸入する野草を想定
サクラの木	乳鉢で十分粉碎	硬い住宅用木片を想定
薄力小麦粉	24 $\mu$ m	台所内でよく使用される粉末を想定
粉末アルミナ	10 $\mu$ m	砂塵を想定

### (3) 試料による接触不良の模擬

表 3-4 に接触不良を模擬させた試料の詳細を示す。乾燥野草，サクラの木および薄力小麦粉は一般家庭の開閉器内部に見られる柔らかい綿毛などを模擬する試料として，粉末アルミナは砂塵など硬い試料として選定した。なお，乾燥野草，サクラの木については，アルミナ乳鉢で十分粉碎し使用した。この試料を耳搔き状の匙で接点間に挟み込み，20～30 回可動接触子を上下させ，接点間電圧が 100mV 以下となるような接触状態を人為的に作った。また，接点表面の酸化・硫化皮膜が接触抵抗に与える影響については，一般に酸化皮膜は 0.1A 以上の電流で破壊され，硫化皮膜は機械的に破壊されると言われている<sup>(3)・(5)</sup>。よって本実験における皮膜は，通電電流あるいは可動接触子の上下運動により十分破壊されてい

るものと見なした。

#### (4) 実験方法

実験は良好な接点と乾燥野草，サクラの木，小麦粉およびアルミナで模擬させた接触不良接点に，正弦波の電流 0.5，1，2，5A をそれぞれ通電した。そして，電線接続端子から超音波振動を徐々に加え，接点間電圧が波形的に最大となる点を測定した。なお，測定回数は各電流についてそれぞれ 5 回行った。

データは接点間の電圧および電流波形，超音波振動子入力端の電圧および電流波形をそれぞれ同時にデジタルオシロスコープに記録し，その実効値を算出した。

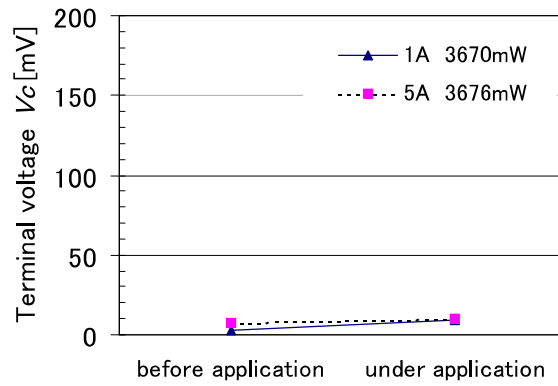
### 3.3.2 実験結果と考察

#### (1) 電圧実効値増大による検出

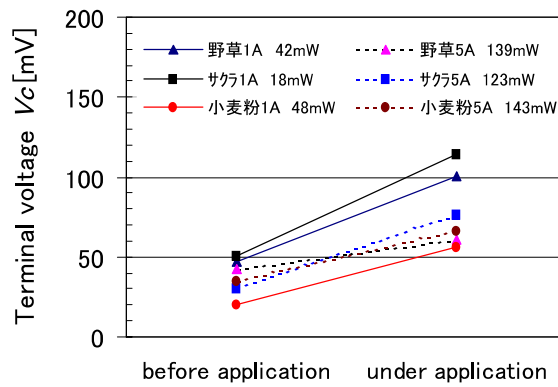
図 3-7 は良好な接点，乾燥野草，サクラの木，小麦粉およびアルミナにおける超音波印加前と印加中の接点間電圧で，測定回数 5 回の平均値を示す。なお，グラフに併記した電力値は，電圧が最大を示した時の超音波出力の平均値である。

同図(a)の良好な接点では，超音波出力を徐々に加えても電圧値の変化は少なく，約 4W まで加えたが，たかだか 6mV の増加に過ぎなかった。一方，同図(b)の乾燥野草，サクラの木および小麦粉による接触不良接点に超音波出力を徐々に加えていくと，電圧値は超音波出力に比例して増大し，それぞれグラフに記した電力値で最大となった。この時の増加幅は約 20~60mV であった。さらに，同図(c)のアルミナでは，1A 通電時において超音波を 1.9W 加えた時，4mV 増加したものの，5A では約 4W まで加えたが電圧の増加は無く，むしろ減少する傾向にあった。

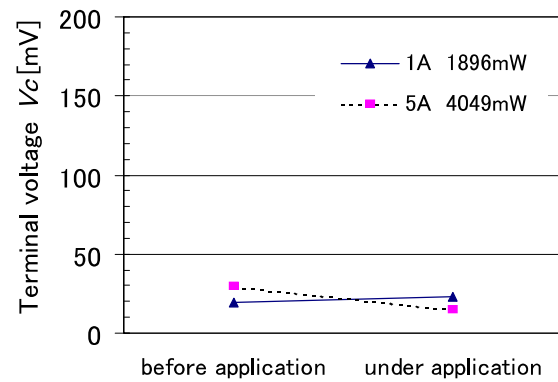
ここで，電圧値が大きく増加した同図(b)のグラフについて抵抗分として計算すると，増加幅は何れの試料においても 5A 通電時の方が小さくなった。図 3-8 に乾燥野草における抵抗増加の例を示す。例では 0.5A の時の増加幅が 83mΩ に対し，5A では 3mΩ と非常に小さい。これは通電電流により接点接触面にジュール熱が発生し，接触面内の試料が軟化・破壊され抵抗の増加が抑えられたためと考えられる。このように乾燥野草など柔らかい試料における接触不良検出は，電流の大きい状態では抵抗の増加よりも電圧値の増加で見れば容易に行える。



(a) 良好な接点



(b) 乾燥野草, サクラの木および小麦粉



(c) アルミナ

図 3-7 超音波印加と接点間電圧

Fig.3-7 Application of ultrasonic wave and terminal voltage value

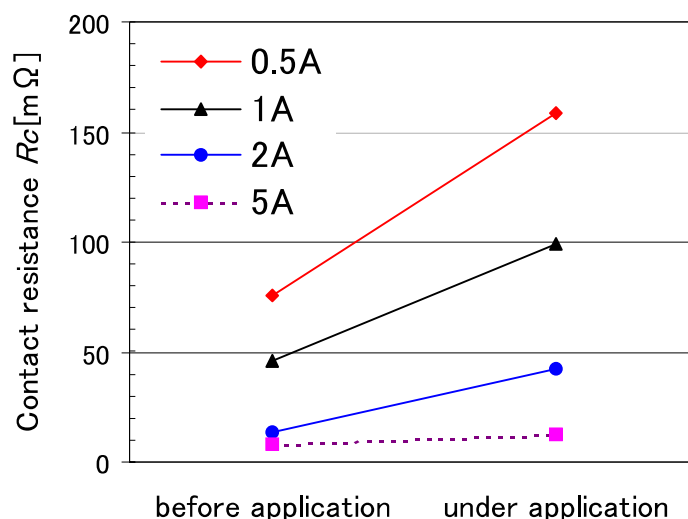


図 3-8 乾燥野草における超音波印加と接触抵抗

Fig.3-8 Application of ultrasonic wave and contact resistance in case of dried grass

(2) 電圧波形パターンと接触不良状態

図 3-9 に良好な接点, 乾燥野草, サクラの木, 小麦粉およびアルミナにおける, 超音波印加前と印加中の接点間電圧波形の一例を示す。図の左側が 1A 通電時, 右側が 5A 通電時でそれぞれ左右に印加前と印加中を示す。なお, 電流波形は良好な接点のグラフに併記した。

良好な接点では超音波出力を約 4W まで徐々に加えたが, 電圧波形は超音波振動子からの振動成分(28kHz)が重畳していく程度で, 大きな変化は生じなかった。

乾燥野草, サクラの木および小麦粉に超音波出力を徐々に加えていくと, 電圧波形は超音波出力に比例して増大し, それぞれグラフに記する電力値で最大波形を示した。さらに超音波を数 W まで加えていくと, 場合によって電圧波形は減少していき, 良好な接点のような波形となった。乾燥野草などの柔らかい試料では, 電圧波形は電源周波数の 60Hz 成分が増大し, 超音波の振動成分の重畳は小さかった。これは接点接触面内の乾燥野草などの柔らかい試料が, 超音波振動により変形・移動し, 抵抗が増大したものと推測できる。また, サクラの木 5A 通電時には 60Hz 成分と超音波の振動成分が同程度に大きく現れた。

一方, アルミナの場合, 超音波出力を徐々に加えていくと, 1A 通電時のように 60Hz の電圧波形に超音波の振動成分が重畳し, 超音波出力 146mW で最大を示した。さらに超音波を数 W まで加えていくと, 電圧波形は減少していき, 良好な接点のような波形となった。また, 5A 通電時のように超音波出力を約 4W まで加えても, 60Hz 成分は増大せず減少す

る例もあった。測定後、接触面を観察すると細かい傷のようなものが生じていた。1A 通電時の電圧波形は 60Hz に超音波の振動成分が重畳し、波形全体が 60Hz の正弦波状をしている。この接点では接触面内の硬いアルミナが超音波の振動により接触面に窪みを作り、窪みの中でアルミナが浮き沈みして 28kHz の高周波電圧が生じたものと推測する。また、5A 通電時の 60Hz 成分の減少については、通電電流によるジュール熱がアルミナの窪み部分を軟化させ接触面同士が導通し、抵抗が減少したためと考えられる。なお、酸化銅についても同様な実験を行ったが、結果はアルミナと同じであった。

### (3) 超音波出力レベルの検討

図 3-10 に良好な接点、乾燥野草、サクラの木、小麦粉およびアルミナにおける、接点間電圧が波形的に最大となった時の超音波出力値を示す。グラフにはそれぞれ 5 回の測定データを表示してある。なお、電圧波形が増大しないデータについては、電力増幅器で出力できる上限値を記した。

良好な接点では何れも超音波出力を約 4W まで加えたが、電圧波形に大きな変化は見られなかった。乾燥野草およびサクラの木のような試料の性状が不均一なものと、小麦粉のような均一なものとはデータのばらつきに差が生じたが、良好な接点と比較すると何れの場合も 1W 以下の超音波出力で電圧波形は最大を示した。

このように乾燥野草などの柔らかい試料の接触不良接点では、超音波出力を 0~1W まで徐々に加えていく間で、電圧値は増大するため接触不良の検出は可能である。

Vertical axis : Voltage [V], Horizontal axis : Time [s]

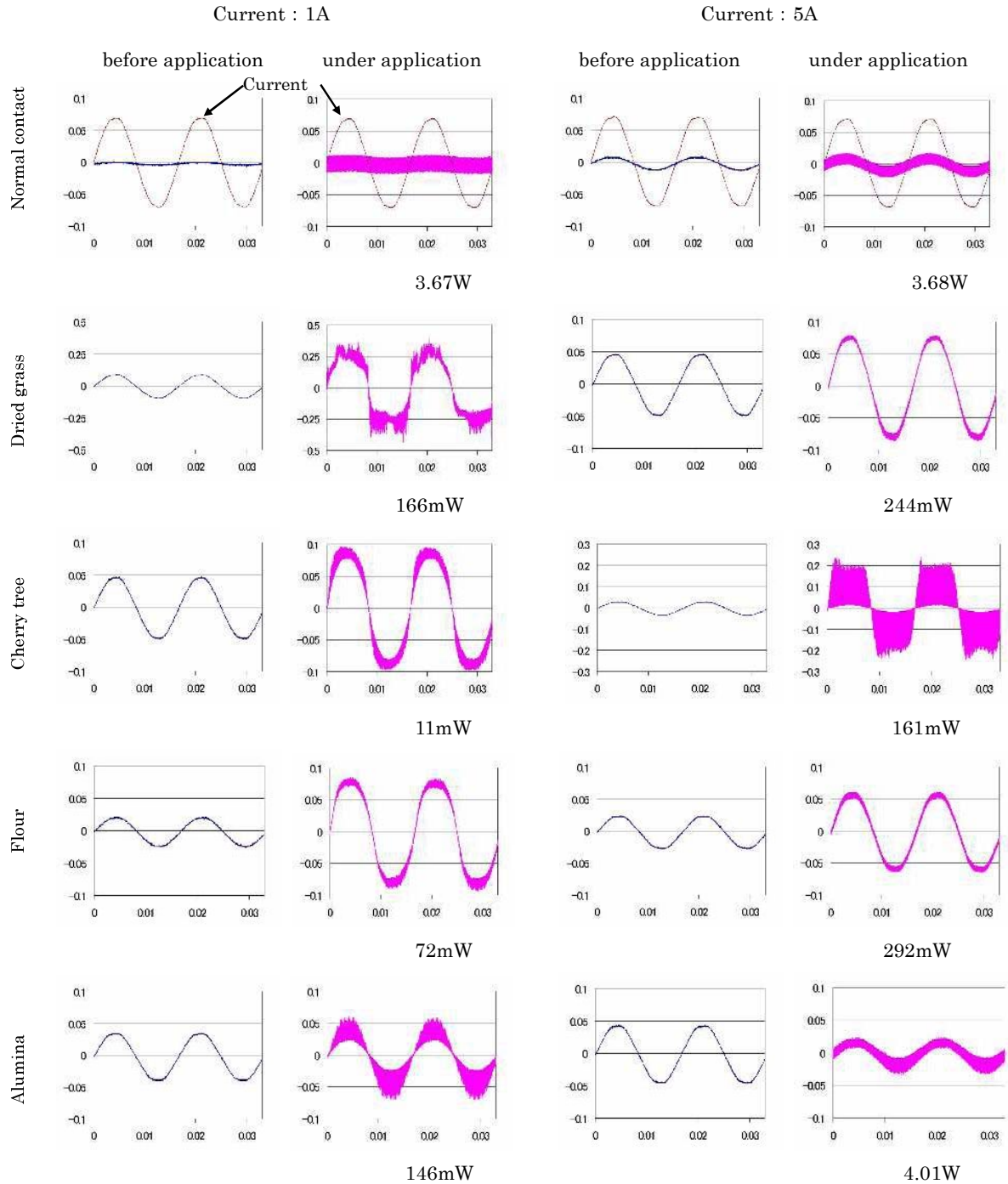


図 3-9 超音波印加時の接点間電圧波形

Fig.3-9 Terminal voltage waveform between before and under at application of ultrasonic wave

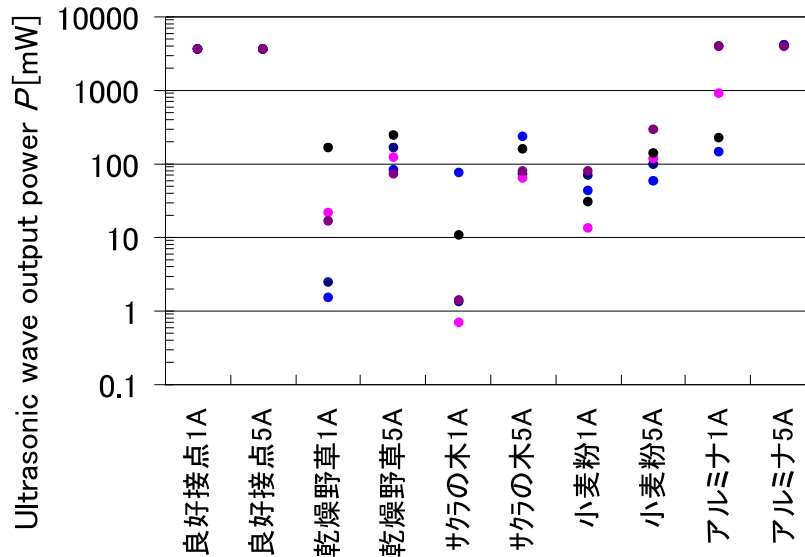


図 3-10 接触不良状態と超音波出力値

Fig.3-10 Poor contact states and ultrasonic wave output power

### 3.3.3 30A 領域における超音波法の有効性

#### (1) 実験概要

図 3-5 の実験回路において、電源部分を容量の大きい電力増幅器に変え通電電流を 10, 20, 30A と設定し、30A 領域までの超音波法の有効性を検証した。なお、超音波の印加および接触不良の模擬は 3.3.1 節と同様である。

#### (2) 実験結果と考察

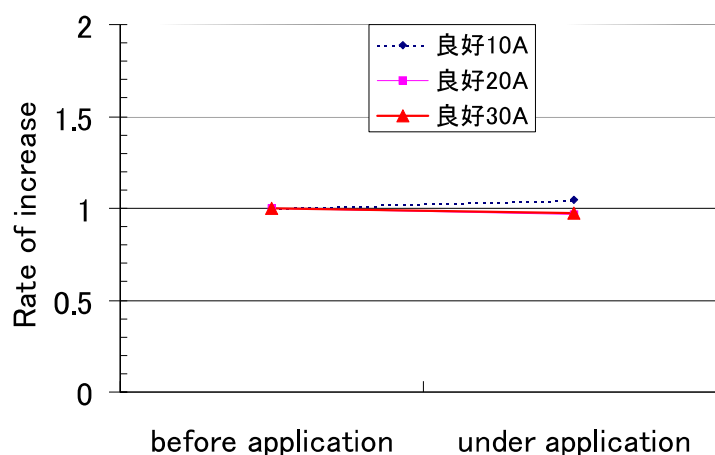
実験結果を図 3-11 に示す。図は超音波印加前の端子間電圧を基準としての増加率で示しており、値は 5 回の平均である。同図(a)の良好な接点においては、通電電流が 30A までの領域でも超音波印加による端子間電圧の変化はほとんど見られなかった。

一方、同図(b)の小麦粉、乾燥野草の接触不良接点では、3.3.2 節の通電電流 5A までの実験結果と比較すると、増加率は小さくなる傾向にあった。5A までの実験では増加率は 2 倍以上であったが、本実験の 10A 以上では増加率は減少し平均で 1.29 倍であった。

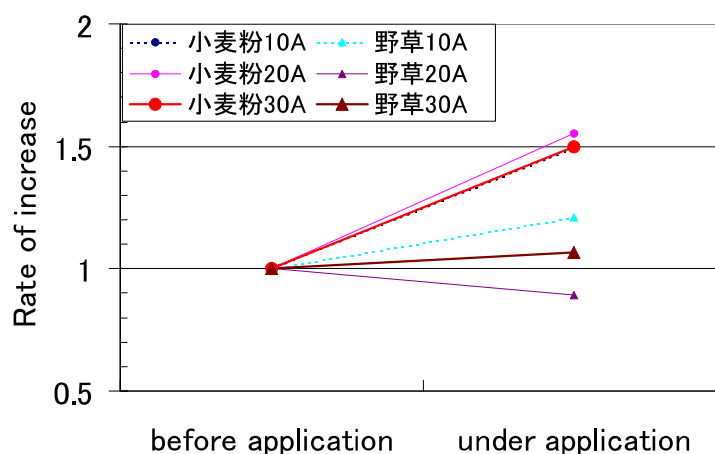
さらに、小麦粉と乾燥野草を比較すると小麦粉の方が増加率は 1.5 倍以上あり、良好な接点 0.96 倍と比較すると判別は容易である。しかし、乾燥野草においては 20A で 0.9 倍、30A

で 1.06 倍と増加率は小さく、状態によっては良好な接点と判別出来ないケースがあった。そこで実験後に接点表面を確認したところ、乾燥野草は黒く変色しその量も減少していたことから、ジュール熱による乾燥野草の焼損・減少が増加率の下がった一因と考えられる。

以上の実験結果から、平均値で見れば良好な接点との判別は可能であるが、個別のデータでみると超音波印加による端子間電圧の変化が良好な接点と区別できないケースもあり、



(a) 良好な接点



(b) 小麦粉, 乾燥野草

図 3-11 30A 領域における接点間電圧の増加

Fig.3-11 Increase of terminal voltage in case of 30A



場合によっては接触不良を検出できない恐れがある。

### 3.4 市販開閉器による有効性の検討<sup>(6)</sup>

#### 3.4.1 実験概要

##### (1) 実験回路

図 3-12 に市販開閉器を用いた実験回路を示す。図の左側が電流発生回路，右側が市販開閉器，中央上部が超音波発生回路である。図 3-13 に実験の様子を示す。

超音波は，発振器から 28kHz の信号電圧を発生させ，電力増幅器(Amp.)を通して超音波振動子に入力した。そして約 30N の荷重で電源側電線接続端子に当て超音波を加えた。

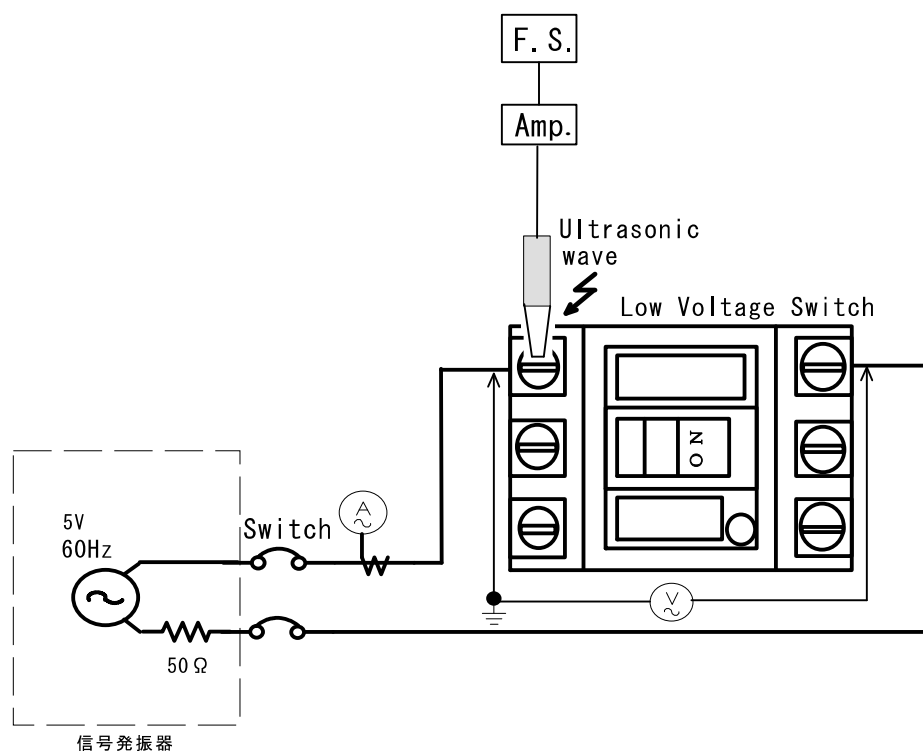


図 3-12 市販開閉器での実験回路

Fig.3-12 Experiment circuit in commercial switch



図 3-13 実験風景

Fig.3-13 Experiment scenery

表 3-5 使用した開閉器の仕様

Table 3-5 Specification of used switches

開閉器	定格電流 [A]	構造	R 相接点圧力 [N]	製造者
30A①	30	A	2.9	A 社
30A②	30	A	7.0	B 社
30A③	30	A	7.2	C 社
30A④	30	B	11.3	D 社
60A①	60	B	10.6	C 社
60A②	60	B	4.9	B 社
100A	100	B	7.5	B 社
200A	200	B	19.1	B 社

## (2) 使用した開閉器と接触不良模擬

使用した市販開閉器は、2.3 節で使用台数の多かった 30~60A の開閉器を中心に 8 台とした。その仕様を表 3-5 に示す。表中の構造とは開閉器電源側の銅板の形状を指し、図 3-14 に示す A、B の 2 種類に分類した。構造 A は 30A クラスの開閉器によく見られる構造で固定接触子が直線状になっているもの、構造 B は固定接触子が屈折しているものである。また、接点圧力は各開閉器の R 相の圧力をバネばかりを用いて測定した。

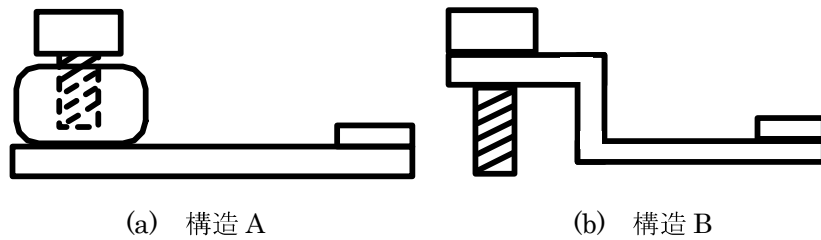


図 3-14 銅板の構造

Fig.3-14 Structure of copper plate

接触不良の模擬には、表 3-4 で示す乾燥野草、サクラの木および小麦粉の 3 種類を試料として用いた。接触不良の模擬はこの試料を耳搔き状の匙で開閉器接点間に挟み込み、20～30 回開閉操作をさせ、端子間電圧が数十 mV 以下となるような接触状態を人為的に作った。

### (3) 実験方法

良好な接点と接触不良を模擬した接点に 0.1A の電流を通電し、開閉器電源側端子に超音波を約 10W まで徐々に加えた。測定は端子間の電圧および電流波形、超音波振動子入力端の電圧および電流波形をそれぞれ同時にデジタルオシロスコープに記録し、その実効値を算出した。測定回数は各 5 回である。

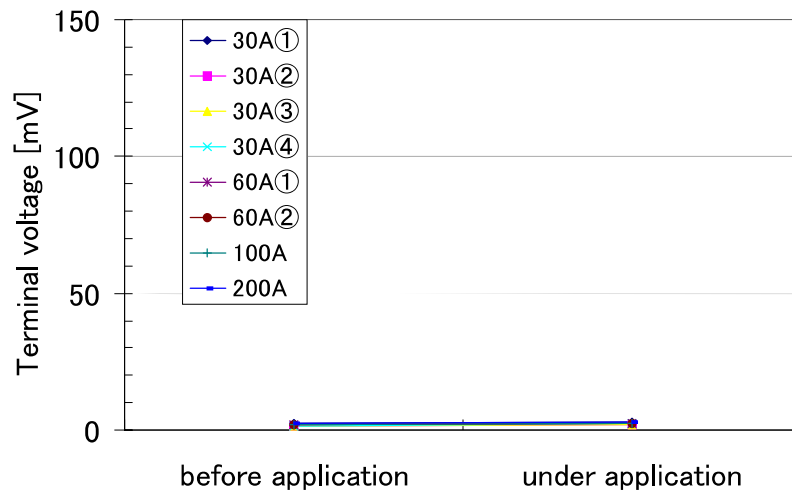
なお、今回は開閉器の構造や定格容量に着目したため、接点間における電流のジュール熱の影響を少なくするために通電電流は 0.1A とした。

## 3.4.2 実験結果と考察

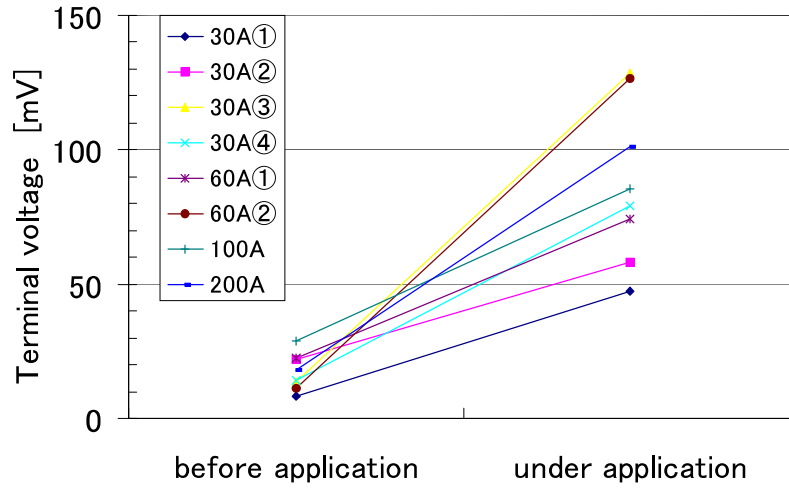
### (1) 接触不良状態における端子間電圧の増加

図 3-15 に超音波印加前と印加中の端子間電圧を示す。グラフは各測定の 5 回の平均値である。同図(a)の良好な接点では、何れの開閉器においても超音波を約 10W まで印加したが端子間電圧に変化はなかった。一方、同図(b)(c)(d)の接触不良を模擬した接点では、何れの開閉器においても超音波出力を徐々に加えていくと端子間電圧は増加し、最小で 20mV、最大で 110mV の増加であった。

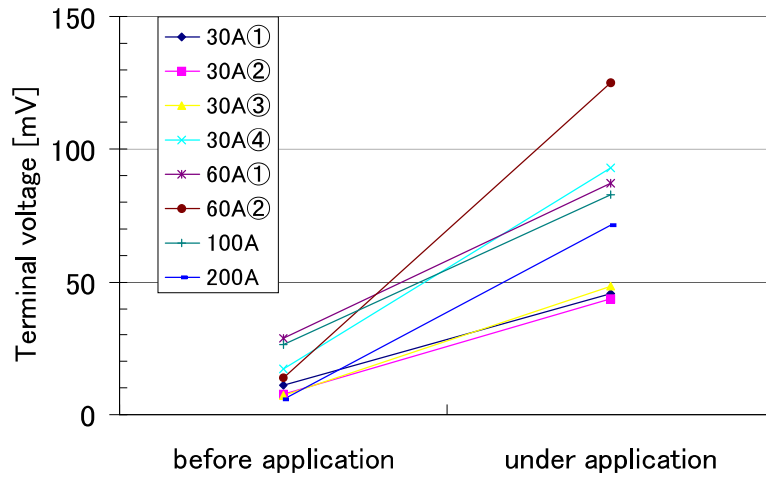
実験には開閉器の接点圧力が 2.9～19.1N、銅板の構造がそれぞれ異なる 8 種類の開閉器で超音波法の有効性を検証したが、何れの場合も接触抵抗は増大した。このことは接点圧力約 20N の 200A クラスの開閉器においても、超音波振動は接点部分まで確実に伝わり、接触抵抗を増大させることが可能であることの現れである。



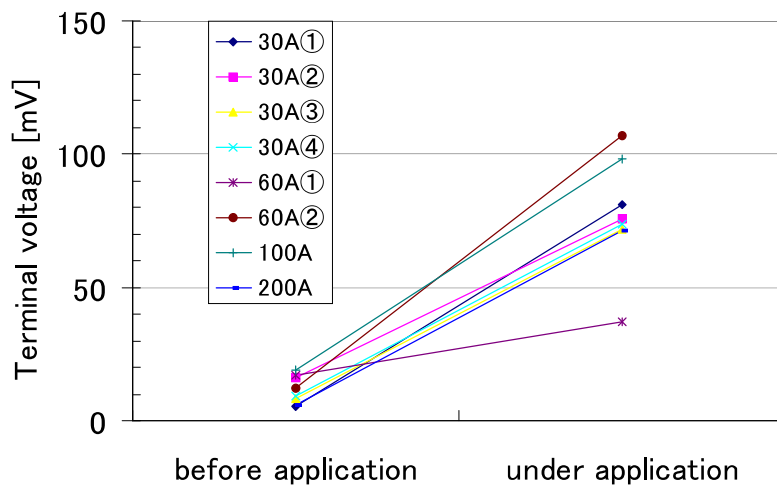
(a) 良好な接点



(b) 乾燥野草



(c) サクラの木



(d) 小麦粉

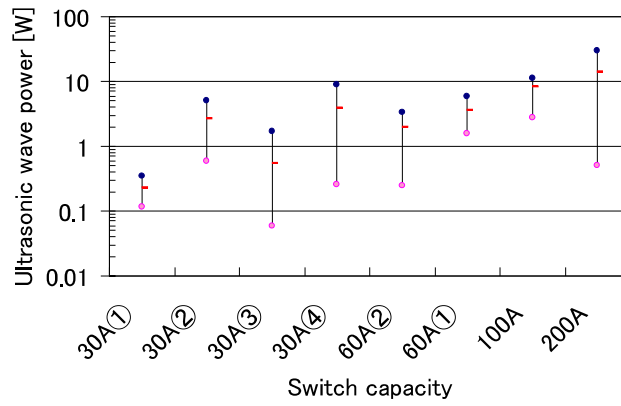
図 3-15 市販開閉器による超音波印加と接点間電圧

Fig.3-15 Application of ultrasonic wave and terminal voltage value in case of commercial switches

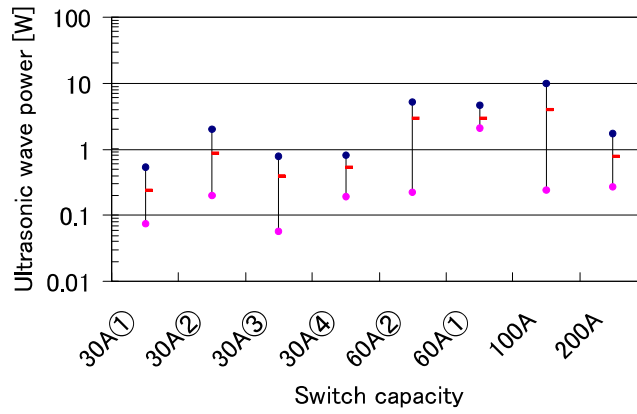
## (2) 超音波出力と接点圧力の関係

実験において端子間電圧が最大となったときの超音波出力値を図 3-16 に示す。グラフは上から接触不良を模擬させた試料(a)乾燥野草, (b)サクラの木, (c)小麦粉である。各グラフの縦軸は超音波出力値で上から最大値, 平均値, 最小値, 横軸は開閉器の定格容量で, 定格容量が同じ開閉器については接点圧力の小さいものから並べてある。

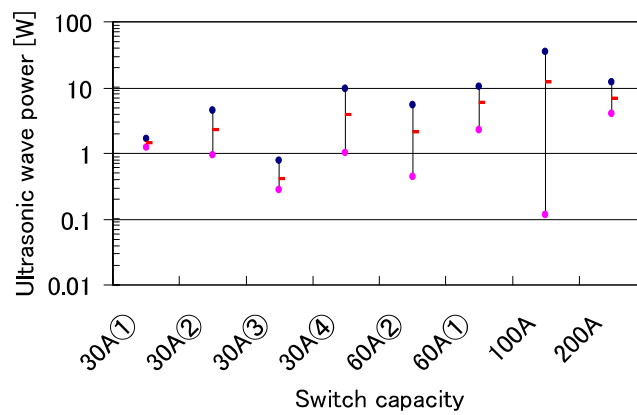
グラフより何れの開閉器においても超音波出力が約 100mW~10W の範囲で接点間電圧は最大となっている。また, 開閉器の容量と超音波出力の関係は, 接点の材質や形状, 圧力に左右されるが, 今回の実験では若干ではあるが比例している傾向にあった。これは容量の大きい開閉器の接触不良を検出するには, より大きな超音波出力が必要なことになる。



(a) 乾燥野草



(b) サクラの木



(c) 小麦粉

図 3-16 開閉器容量と超音波出力

Fig.3-16 Switch capacity and ultrasonic wave power

### 3.5 結言

本章では、超音波を使った低圧開閉器接点の接触不良検出法の提案とモデル開閉器接点および市販開閉器による検出の有効性について実験的検証を行った。

モデル開閉器接点を用いた実験は、30Aクラスの銅板と接点を組み合わせたモデル開閉器接点を作製し、乾燥野草や粉末アルミナなどで各種接触不良状態を模擬し、通電電流5Aと30A領域までの超音波法の有効性を検証した。検証では接点間に現れる電圧波形に注目し、電圧実効値とその波形パターンから接点の接触不良状態について検討した。さらに超音波出力レベルを可変し、電圧の増大との関係についても検討を行った。

市販開閉器による実験では、実際に市販されている30~200Aクラスの接点圧力の異なる開閉器を用いて、超音波法の検出有効性を検証するとともに超音波印加時の接点間電圧値の様相、超音波出力と開閉器容量の関係について検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 接触抵抗の低い辛うじて導通している接触不良接点に超音波を印加すると、接触抵抗は増大するため接触不良の検出は可能である。
- (2) 乾燥野草、サクラの木など柔らかい試料の接触不良接点においても、超音波の印加により電圧は増大するため、接触不良の検出は可能である。とくに一般家庭の開閉器では、日中の負荷電流は5A以下が多いことから、検出には十分有用である。一方で、負荷電流が30Aまでの領域については、試料の種類や接触状態によっては、良好な接点と判別出来ない場合もある。
- (3) アルミナのような硬い試料の接触不良接点では、超音波を印加しても電圧実効値の増大は少ないため検出は難しい。
- (4) 200Aクラスまでの市販開閉器においても、超音波の印加により接触抵抗は増大するため、接触不良検出の可能性は十分ある。

本章で行った検出は、辛うじて導通している接触不良接点を超音波の印加により接触抵抗を増大させ検出する手法である。しかし、実際の接触不良は開閉器操作直後に起きることもあり、その場合、この超音波による検出では対応できない。そのため、開閉器操作直後に発生する接触不良については、新たに別の手法で検出する必要がある。さらに接触不良に伴い発生する異常電圧について、負荷機器に印加されないよう確実に防止することも必要である。



### 第3章 参考文献

- (1) 原英喜, 中村光一: “超音波とダイオード転流回路を用いた低圧開閉器の接触不良検出法の提案”, 電気学会論文誌 B, 121 巻 3 号, pp.413-414 (2001)
- (2) 原英喜, 中村光一: “一般家庭における低圧遮断器接点の接触抵抗とジュール熱”, 電気設備学会誌, Vol.21, No.12, pp.1031-1032 (2001)
- (3) 土屋金弥, 玉井輝雄: “接点皮膜の電氣的破壊に及ぼす軟化電圧および溶融電圧の影響”, 電気学会論文誌 44-21, Vol.89-3, No.966, pp.501-508 (1969)
- (4) 玉井輝雄, 土屋金弥: “接点皮膜の導電特性と電氣的破壊の機構”, 電気学会論文誌 48-A-33, Vol.93-A, No.6, pp.238-243 (1973)
- (5) 愛知久史, 松村年郎, 宮地巖: “銀, 銅およびアルミ点接触子の直流 300A 通電時における接触抵抗特性”, 電気学会論文誌 B, 118 巻 7/8 号, pp.825-829 (1998)
- (6) 松井彰, 原 英喜, 鵜飼裕之, 中村光一: “超音波法による市販開閉器接触不良検出の有効性”, 平成 15 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.329-330 (2003)

## 第 4 章

# ダイオード転流回路を用いた接触不良検出の 実用性の検証と異常電圧印加防止

### 4.1 緒言

一般家庭の電気機器の点検，漏電調査をする際には，低圧開閉器を開閉操作する。この時，開閉器接点に接触不良が生じている場合，負荷機器に異常電圧を印加させる恐れがある。そこで第 3 章において，開閉操作前あるいは操作後の辛うじて導通している接触不良接点を検出する手法について報告した。

この開閉器接点の接触不良は，開閉器の投入操作後に発生することが多いため，投入直後に検出し対処しなければならない。先に報告した超音波を用いた接触不良検出では，接触抵抗の低い辛うじて導通している接触不良検出を目的としているため，投入操作直後の接触不良の検出とそれに伴って発生する異常電圧の防止は困難であった。

そこで本研究において，ダイオード 2 個を逆接続した回路(以下，ダイオード転流回路という)を用いて，開閉器操作直後の接触不良を検出し，さらには負荷機器への異常電圧印加を防止する手法を見出し報告した<sup>(1)</sup>。

本章では，ダイオード転流回路による接触不良検出法の提案と，100/200V の実負荷による実用性を実験的に検証し，手法の確立を行う。実験は単相 3 線式回路に 3kW 程度の負荷を接続し，0～30A 領域までの実用性を検証し，接触不良の検出レベルを明らかにした。また，ダイオード転流回路と漏電遮断器を組み合わせ，漏電遮断器の漏電検出機能を用いた接触不良検出についても実用性の検証を行った。さらに，開閉器接点の接触不良に伴って生じる異常電圧をダイオード転流回路により防止する手法についても検証する。

## 4.2 ダイオード転流回路による接触不良検出<sup>(1)</sup>

### (1) 検出方法

本手法はダイオード転流回路を開閉器に接続した状態で開閉操作し、その波形形状から接触不良を検出する。図 4-1(a)に検出回路、同図(b)にダイオード転流回路の写真をそれぞれ示す。

検出はダイオード転流回路を接続した状態で開閉操作する。接点が良い場合、接触抵抗は数  $m\Omega$  以下と小さいため、ダイオード両端電圧  $V_n$  はダイオード飽和電圧  $V_s$  を超えず図 4-2(a)に示すように正弦波状となる。一方、接点が接触不良の場合、接触抵抗は数十・数百  $m\Omega$  以上と大きいことから、 $V_n$  は  $V_s$  を超えるため同図(b)に示すように方形波状となる。

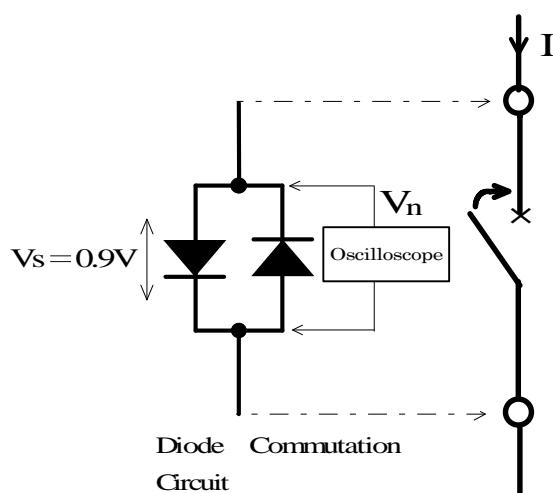
本手法はダイオード両端の  $V_n$  波形が正弦波なら良好接点、方形波状なら接触不良接点として検出するものである。

### (2) 検出手順と特徴

検出はダイオード転流回路を開閉器の一次・二次側端子間に接続し、ダイオード両端の電圧波形から行うもので、検出手順を表 4-1 に示す。

また、本手法の特徴を挙げると以下の通りである。

- 開閉器の蓋を開けることなく、開閉器操作直後の接触不良を検出可能である。



(a) 検出回路

(b) 使用したダイオード転流回路

図 4-1 ダイオード転流回路による検出回路

Fig.4-1 Detection circuit by diode commutation circuit

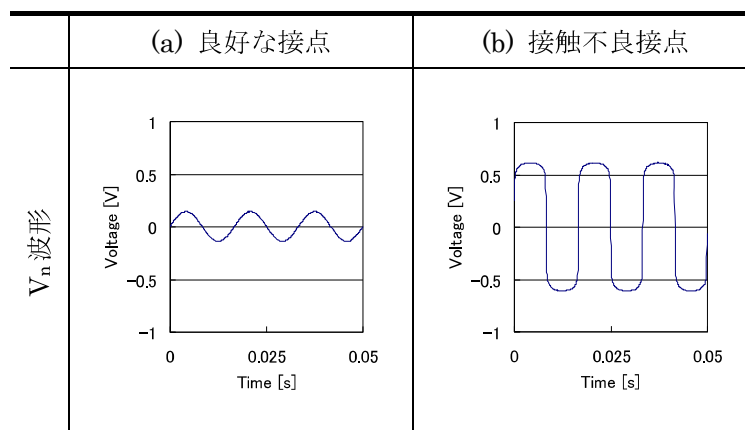


図 4-2 ダイオード両端の電圧波形

Fig.4-2 Voltage waveform of diode end

表 4-1 検出手順

Table 4-1 Detection procedure

手 順	内 容
手順 1	ダイオード転流回路を開閉器の一次・二次側端子間に接続する。
手順 2	ダイオード両端の電圧波形を観測しながら開閉器を投入する。
手順 3	電圧波形が正弦波の場合は良好，方形波状の場合は接触不良と判定する。
手順 4	もし，電圧波形が方形波状の場合は，接点が接触不良の疑いがあるため，開閉器を直ちに開放し内部点検を行う。

- 検出原理は簡単で，判定にも熟練を要しない。
- 開閉器操作時に接触不良が生じて，ダイオード転流回路により負荷側の電圧は規定電圧以内に維持できる。

### 4.3 接触不良検出の実用性の実験的検証

#### 4.3.1 実験概要

##### (1) 実験回路

接触不良検出の実用性を検証するために，100/200V の実負荷回路で実験を行う。図 4-3 に単相 3 線式の実験回路を示す。ダイオード転流回路は図中央の開閉器の中性線(N 相)端子に接続し，下位側に 100V の負荷機器を接続した。使用したダイオードは定格 30A(30A 時

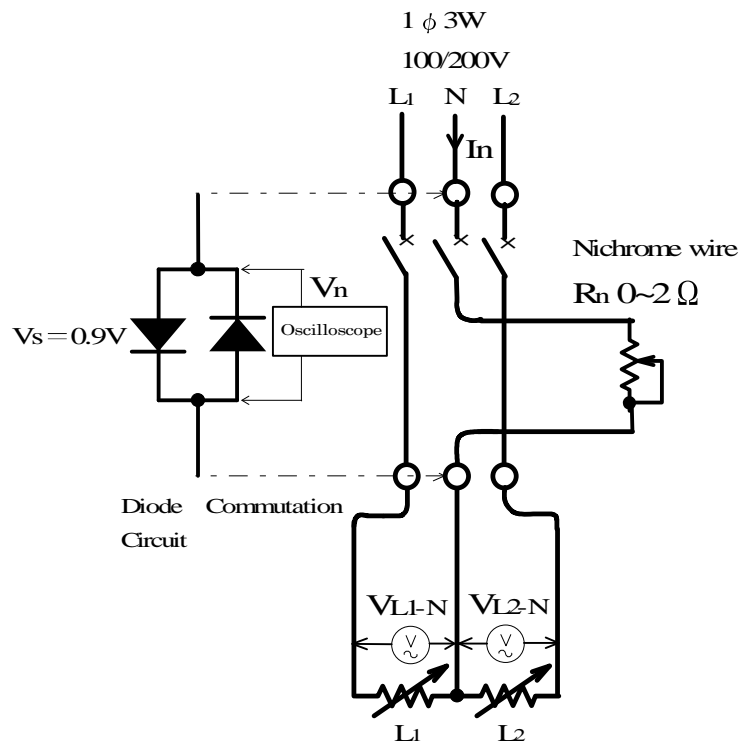


図 4-3 ダイオード転流回路による実負荷実験回路

Fig.4-3 Experimental circuit by diode commutation circuit

の飽和電圧  $V_s$  : 約 0.9V)の整流用ダイオードで、試作回路の概観を図 4-1(b)に示す。開閉器接点の接触不良は、中性線に 0~2Ω のニクロム線抵抗  $R_n$  を接続することで模擬している。

## (2) 実験方法

使用した負荷機器  $L_1$ ,  $L_2$  は抵抗負荷であり、負荷条件は表 4-2 に示す通りで、中性線電流  $I_n$  を 0~30A の間で設定できるように負荷を調整した。なお、 $I_n$  は  $R_n$  の値によっても変動するが、以下、本章では  $R_n=0\Omega$  時に設定した  $I_n$  値を用いて  $I_n$  を表現している。また、文献(2)の調査結果では、一般家庭の日中の負荷電流  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  はほとんどの家庭において 1A 以上 5A 以下で、最大でも 20A であった。これより本実験での最大負荷を約 3kW とし、その範囲において負荷を調整することで中性線電流  $I_n$  を 0~30A の間で設定した。

実験は表 4-2 の負荷条件の各  $I_n$  において、 $R_n$  を 0 から 2Ω および  $\infty\Omega$  (断線) と可変させ、開閉器投入時の負荷側電圧  $V_{L1-N}$ ,  $V_{L2-N}$  およびダイオード両端電圧  $V_n$  をデジタルオシロスコープで測定した。

表 4-2 負荷条件

Table 4-2 Load conditions

中性線電流 $I_n$ [A]( $R_n=0\Omega$ 時)	負荷 $L_1$ [kW]	負荷 $L_2$ [kW]
0	1.65	1.65
1	3.00	2.90
2	2.80	2.60
5	2.80	2.30
10	3.00	2.00
30	3.40	0.40

#### 4.3.2 実験結果と考察

##### (1) ダイオード両端の電圧波形による検出

図 4-4 に中性線電流  $I_n$  を 0, 1, 5, 30A, ニクロム線抵抗  $R_n$  を 0, 0.1, 1 $\Omega$  とした時のダイオード両端電圧  $V_n$  の波形を示す。なお、各図の開閉器投入は 0.025 秒後である。 $R_n$  が 0 $\Omega$ 、即ち良好な接点の場合は、同図(a)に示すように  $I_n$  が 5, 30A と大きくなるにつれ  $V_n$  には開閉器本体の内部抵抗(約 10m $\Omega$ )に比例した正弦波の電圧が現れ、その実効値は最大でも 0.29V であった。一方、 $R_n$  が 0.1 $\Omega$  の場合、 $V_n$  には同図(b)に示すように  $I_n$  が 1, 5A では正弦波の電圧が現れた。30A では丸みの掛かった方形波状の電圧 0.99V が生じた。

さらに、 $R_n$  が 1 $\Omega$  の場合は、同図(c)に示すように  $I_n$  が 1A では正弦波のピーク部分が削れた波形が現れ、その実効値は 0.56V であった。5A では方形波が、30A では丸みの掛かった方形波電圧 1.1V がそれぞれ現れた。

このように正弦波でない波形、即ち方形波状の電圧の有無により接触不良を検出することは可能で、3kW 程度までの実負荷回路においても検出は十分可能である。

##### (2) 検出可能な閾値

方形波状の電圧はダイオード両端電圧  $V_n (=R_n \cdot I_n)$  がダイオード飽和電圧  $V_s$  を超えるため生じることから、負荷の大きさ、即ち中性線電流  $I_n$  の大きさにより  $R_n$  は変化する。そこで  $I_n$  と検出できる接触抵抗  $R_n$  との定量的な関係を以下に評価する。表 4-3 に実験により各  $I_n$  の電流に対し方形波状の電圧が現れ始めた時のニクロム線抵抗  $R_n$  を示す。中性線電流

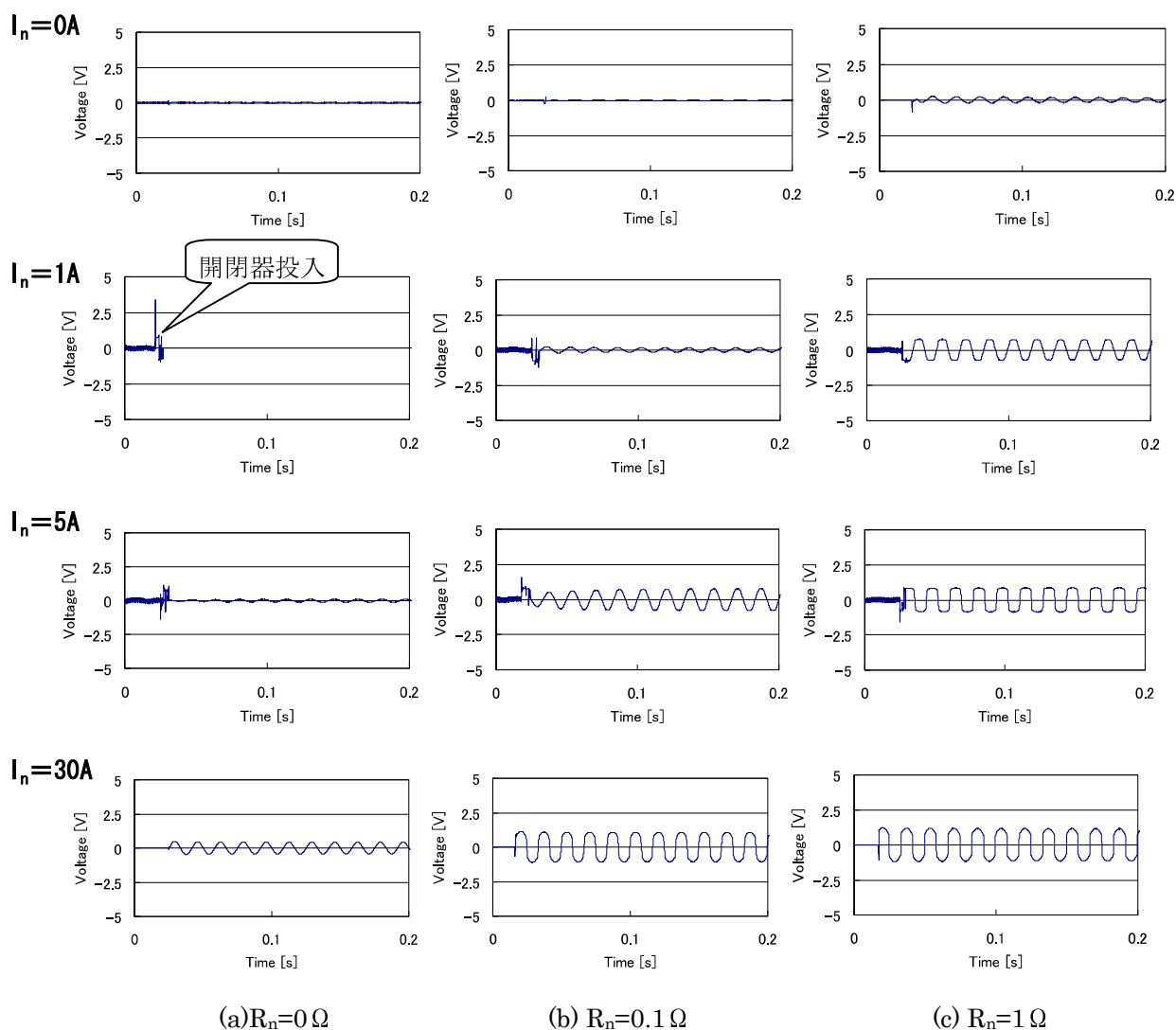


図 4-4 中性線電流  $I_n=0, 1, 5, 30\text{A}$  時のダイオード両端電圧  $V_n$  波形

Fig. 4-4 Example of diode end voltage waveform at neutral line current  $I_n=0, 1, 5, \text{ and } 30\text{ A}$

$I_n=0\text{A}$  では、 $R_n$  を  $\infty\ \Omega$  まで可変しても方形波状の電圧は現れなかった。 $I_n$  が  $1\text{A}$  では  $1.0\ \Omega$  から方形波状の電圧が現れ、 $5, 30\text{A}$  になるにつれ  $R_n$  は  $0.2, 0.035\ \Omega$  と数十  $\text{m}\Omega$  まで下がった。さらに負荷電流が大きくなると  $R_n$  はもっと小さくなると予想される。このように中性線電流が大きくなるにつれ、方形波状の電圧が現れ始める抵抗値は数十  $\text{m}\Omega$  と小さくなるため、 $0.01\ \Omega$  以下の良好な接点も方形波状の波形となる恐れがある。

実際の一般家庭の負荷電流は先に述べたように最大でも  $20\text{A}$ 、 $I_n$  はほとんどの家庭で  $1\text{A}$  以上であることから、中性線電流  $I_n$  を  $1\sim 30\text{A}$  として検出可能な接触抵抗値  $R_n$  を図 4-5 に示す。同図から  $I_n=1\text{A}$  以上であれば、 $1\ \Omega$  以上の時の波形は方形波状であり接触抵抗は确实

表 4-3 方形波状の電圧が現れ始めた時の抵抗値

Table 4-3 Resistance in which rectangular wave-like voltage began to appear

中性線電流 $I_n$ [A]	0	1	2	5	10	30
ニクロム線抵抗 $R_n$ [ $\Omega$ ]	---	1.0	0.5	0.2	0.07	0.035

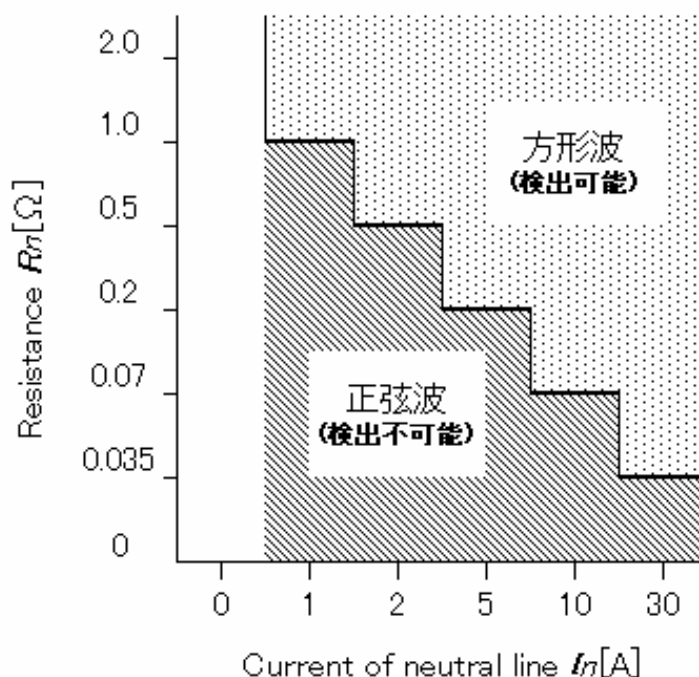


図 4-5 中性線電流と検出可能な接触抵抗値

Fig. 4-5 Neutral line current and detectable contact resistance

に検出可能であることが分かる。また、 $I_n$ の大きい領域、例えば 30A では検出できる接触抵抗値は 0.035 $\Omega$ と高感度になる。一方、 $I_n$ が 1A 以下の場合には接触不良を検出することは困難となるが、ダイオード両端の波形が正弦波であれば  $V_n < V_s$  であり、負荷側の電圧  $V_{L1-N}$ ,  $V_{L2-N}$ は  $101 \pm 6V$  の規定電圧以内に保たれる。

#### 4.4 ダイオード転流回路と漏電遮断器を組合せた接触不良検出

##### 4.4.1 検出原理

図4-6に漏電遮断器を使った接触不良の検出原理を示す。漏電遮断器には漏電検出用の



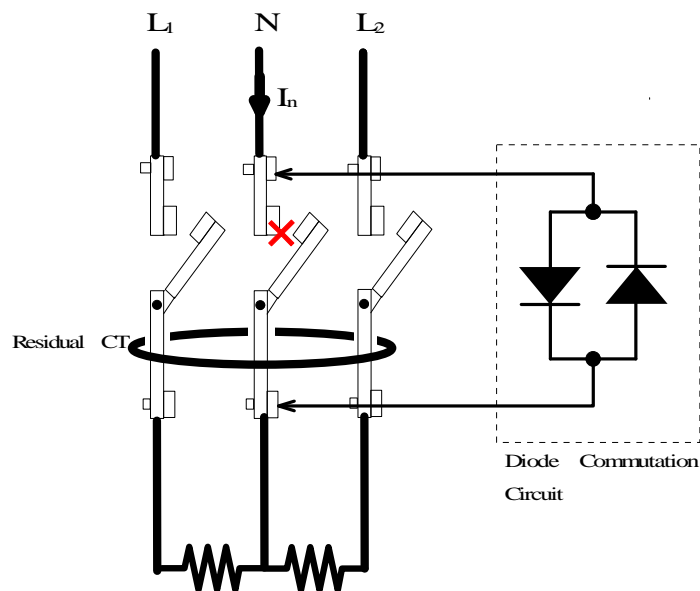


図 4-6 漏電遮断器を使った検出

Fig. 4-6 Detection used residual current operated circuit breaker

CT(Residual Current Transformer)が内蔵されている。このCTは3線の電流ベクトル和から電路の漏電を検出している。

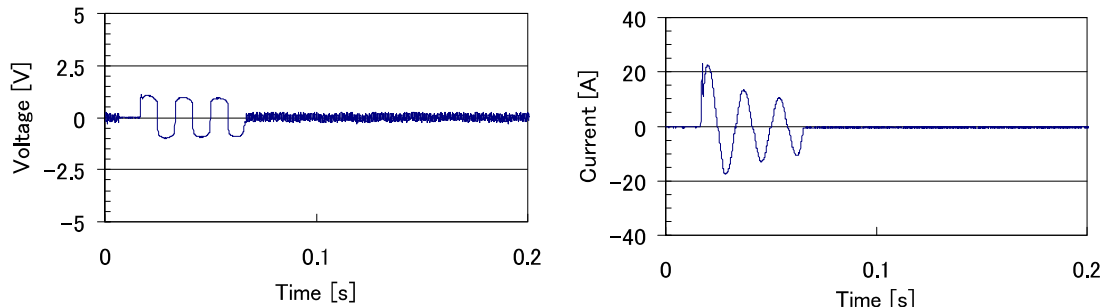
接触不良の検出はダイオード転流回路を図のように接続し、開閉器の操作を行う。この時、開閉器接点が接触不良の場合、接触抵抗による電圧降下分がダイオードの飽和電圧を超えると、ダイオード側に電流が流れ始める。漏電検出用 CT はダイオード側に流れる電流値が漏電検出感度の整定値を超えると漏電と判断し、開閉器を自動的に遮断させる。

このように本手法は、開閉器が漏電遮断器の場合、ダイオード両端の方形波観測をすることなく、遮断器投入直後の開放動作の有無により接触不良を簡易に検出可能である。

#### 4.4.2 有効性の検証

検証では図 4-3 に示す回路の開閉器を漏電遮断器に変更し、先に行った実験と同一条件で行い、投入直後の開放状態を確認した。なお、使用した漏電遮断器は、一般家庭で多く使われている定格 3P30A, 漏電感度電流 30mA, 動作時間 0.1 秒以内である。

その結果、中性線電流  $I_n=1A$  以上であれば、 $1\Omega$  以上の接触抵抗において遮断器は、投入直後、確実に開放動作した。また、開放動作した時の中性線抵抗は最小で  $0.035\Omega$  ( $I_n=30A$ ) であった。図 4-7 に遮断器投入直後の波形例を示す。遮断器を投入するとダイオード両端に



(a) ダイオード両端電圧  $V_n$

(b) ダイオード側電流  $I_a$

図 4-7 漏電遮断器投入直後の検出波形例( $I_n=5A$ ,  $R_n=1\Omega$ )

Fig. 4-7 Example of waveform immediately after closing of earth leakage breaker

は同図(a)に示すように接触抵抗による方形波状の電圧が現れ、ダイオード側には同図(b)に示すように数 A の電流が流れ、遮断器は漏電と見なし 3 サイクルで開放した。

本手法は遮断器投入直後の開放動作状況により接触不良を判定するため、数サイクルのタイムラグはあるものの、中性線電流  $I_n=1A$  以上であれば、 $1\Omega$  以上の接触抵抗は確実に検出できる。また、遮断器投入直後に開放動作した時は、接触抵抗は最小でも  $0.035\Omega$  以上と不良の領域にあり<sup>3)</sup>、接触不良として判定可能である。

#### 4.4.3 超音波印加における接触不良検出

漏電遮断器を開閉操作後、接点が接触不良を起こした場合、電流はダイオード側にバイパスされるため、内蔵する漏電検出用 CT が漏電として検出し、遮断器を直ちに開放させる<sup>4)</sup><sup>5)</sup>。しかし、辛うじて導通している接触不良状態では接触抵抗が低いため検出できない。この場合は、超音波を印加して接触抵抗を増大させてダイオード側に電流をバイパスさせ検出する必要がある。

図 4-8 にダイオード転流回路と超音波を使用した漏電遮断器の接触不良検出時の波形例を示す。上から(a)ダイオード両端電圧、(b)ダイオード電流、(c)負荷電流である。使用した漏電遮断器は長年一般家庭で使用されたもので、T 相接点は腐食のため接触不良状態にある。また、負荷としては 100W の白熱電球を使用した。

超音波を接触不良である T 相の電源側端子に連続して印加したところ、0.034 秒後にダイオード両端電圧  $V_d$ 、即ち接触抵抗が増大し始め、0.043 秒で  $-0.5V$  とダイオードの飽和電圧  $V_s$  に達し、電流はダイオード側に急激に流れ始めた。その後、ダイオード電流は漏電遮断器の感度電流 30mA を超えたため、約 1 サイクル(0.0167 秒)後に遮断器は開放した。

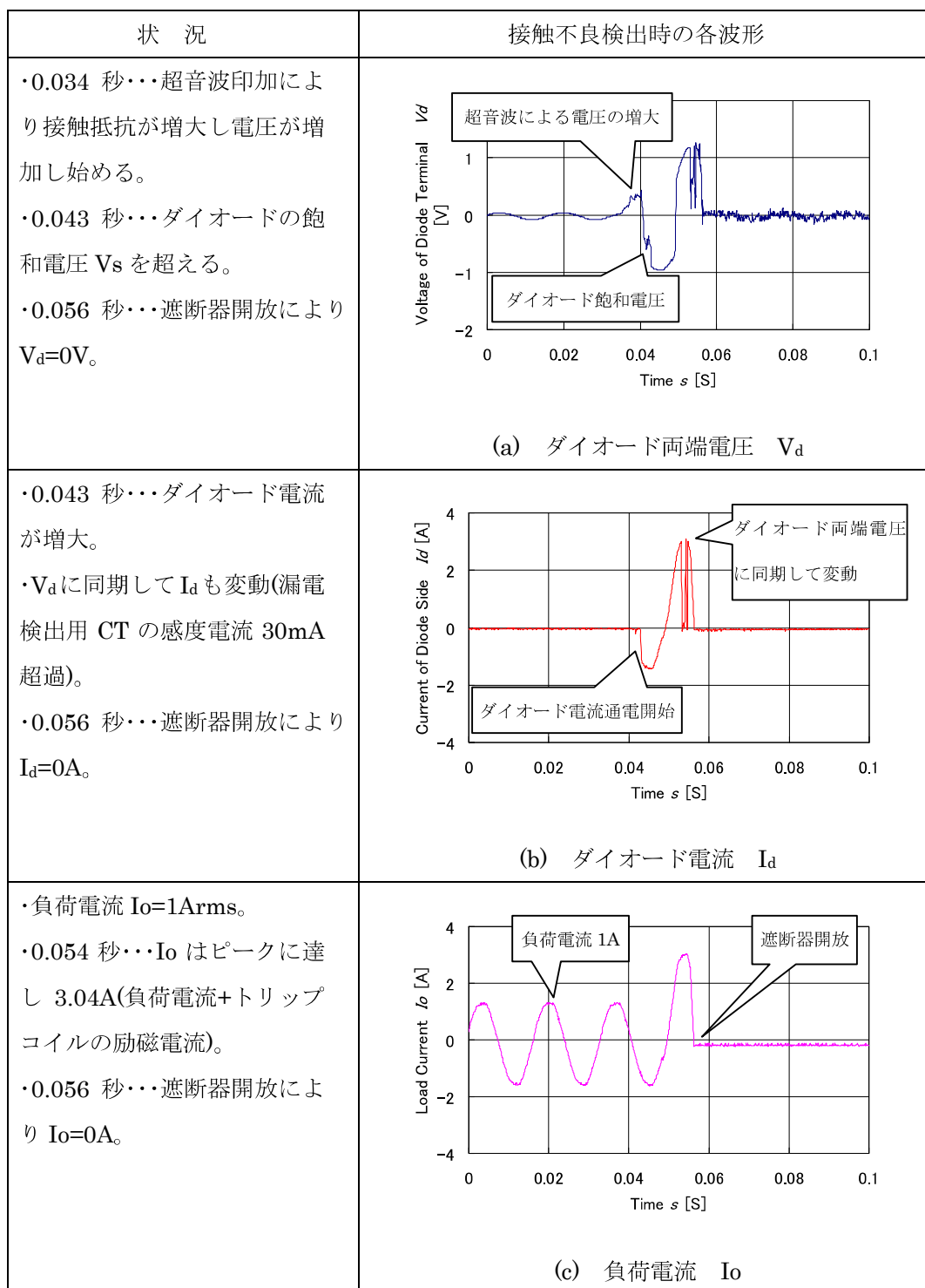


図 4-8 超音波印加時の波形例

Fig.4-8 Wave example on applied ultrasonic wave

ダイオード転流回路を接続した漏電遮断器では、接触抵抗が増加すると電流はダイオード転流回路にバイパスされるため CT は漏電と判断し、遮断器を開放させることから接触不良を検出できる。また、漏電遮断器以外の開閉器では、ダイオード両端に方形波状の電圧が現れるので接触不良を検出できる。

#### 4.5 ダイオード転流回路による異常電圧印加防止<sup>(6)</sup>

開閉器再投入時に接点が接触不良を起こした場合、単相 3 線式においては、負荷機器に通常より高い電圧が印加される恐れがある。また、三相 3 線式においては欠相状態となり負荷機器が焼損する恐れがある。そこで、提案するダイオード転流回路が負荷機器への異常電圧印加の防止機能を併せ持つことを実験的に検証する。

##### 4.5.1 印加防止の原理

単相 3 線式において中性線(N 相)が接触不良を起こすと、接触抵抗  $R_n$  とそこを流れる中性線電流  $I_n$  との積の電圧降下が接触不良個所に生じる。電源電圧を一定とすればこの電圧降下分は、キルヒホッフの法則により、負荷抵抗の大きい方にはプラス(過電圧)され、小さい機器にはマイナス(不足電圧)となって印加される。

そこで、ダイオード転流回路を N 相に取り付けることで、接触不良による電圧降下分( $R_n \cdot I_n$ )はダイオードの飽和電圧  $V_s$  以下(今回使用したダイオードの  $V_s:0.9V$ )となることから、負荷機器に印加される各相電圧はたかだか  $V_s$  分が±の差となって現れる。ゆえに、電気事業法の供給規定で定められる  $101 \pm 6V$  の電圧は保たれる。

##### 4.5.2 有効性の検証

検証は図 4-3 の実験回路において、接触不良を模擬するニクロム線抵抗  $R_n$  を  $0 \sim 2\Omega$  まで可変させ、ダイオード転流回路の有無による負荷側電圧の実効値  $V_{L1-N}$ ,  $V_{L2-N}$  を測定した。図 4-9 の上段にダイオード転流回路が無いとき、下段に有するときの検証結果を示す。

負荷容量がバランスよく接続された状態(中性線電流  $I_n=1A$ )では、同図(a)に示すように  $R_n$  を  $2\Omega$  まで可変させても各電圧  $V_{L1-N}$ ,  $V_{L2-N}$  は約  $101V$  にバランスされており、 $\infty\Omega$  でも  $100V$ ,  $104V$  であった。負荷容量をアンバランスさせた状態、即ち  $I_n$  が  $5$ ,  $30A$  となると、同図(b), (c)に示すように  $R_n$  の増加に伴い  $V_{L2-N}$  は過電圧となる。

一方、ダイオード転流回路を接続した場合には、ダイオード両端電圧  $V_n$ ( $R_n$  両端電圧)は約  $1V$  以下に抑えられるため、同図(b), (c)に示すようにいずれの  $I_n$  においても  $V_{L1-N}$ ,  $V_{L2-N}$  は  $101 \pm 6V$  以内に保たれる。

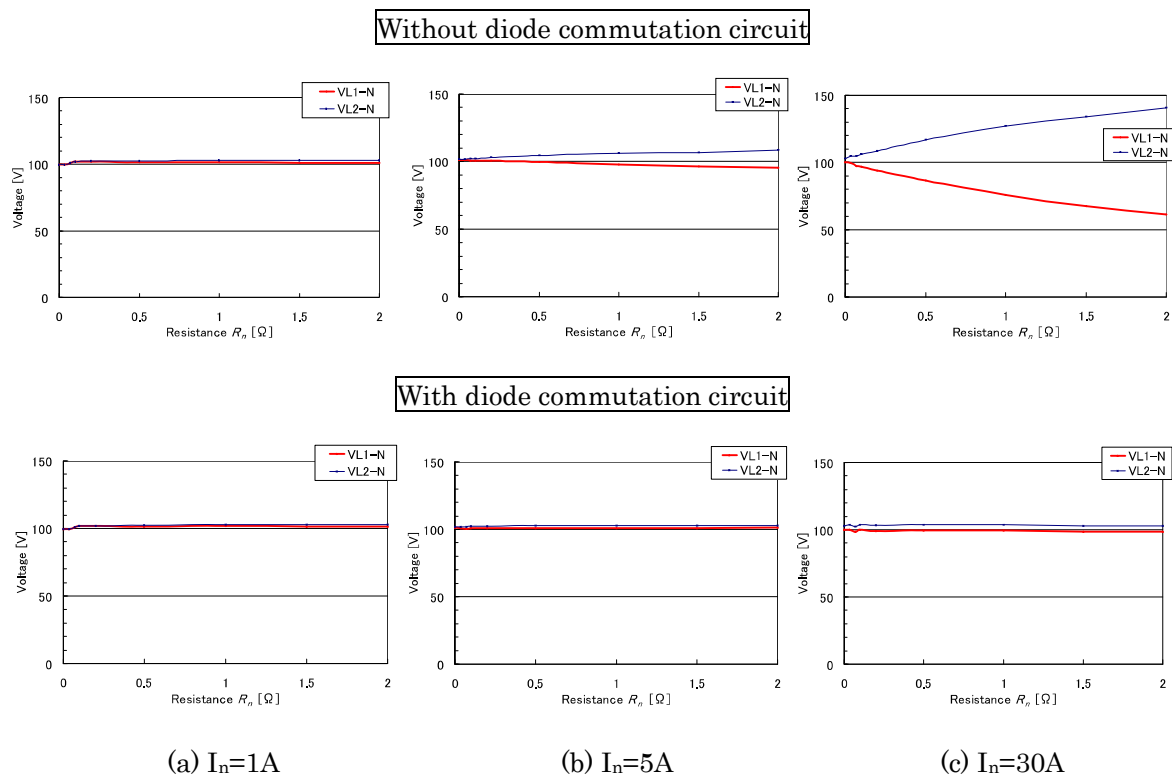


図 4-9 負荷機器への異常電圧印加防止の効果

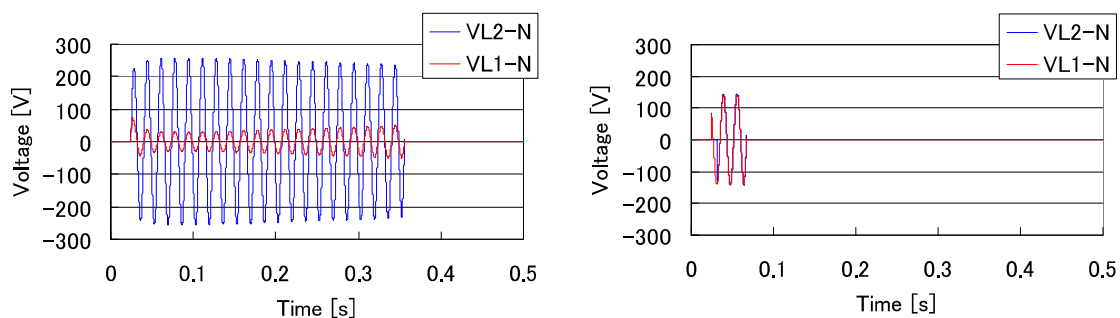
Fig. 4-9 Effect of abnormal voltage protection to load apparatus

このように負荷容量のアンバランス状態で開閉器接点が接触不良を起こすと、負荷機器に異常電圧を印加させる恐れがあるが、ダイオード転流回路の接続によりこの異常電圧の印加は確実に防止できる。

### 4.5.3 中性線欠相保護付き漏電遮断器との比較

新築された一般家庭には、内線規程<sup>(7)</sup>により中性線欠相保護付き漏電遮断器が取り付けられている。この遮断器は単相3線式回路の中性線が接触不良を起こし負荷機器に過電圧(135V)が印加されると、自動的に遮断する開閉器である。

そこで、中性線欠相保護付き漏電遮断器に提案するダイオード転流回路を取付け負荷機器への過電圧印加状態を測定し、その有効性を検証した。検証は図 4-3 の実験回路において、負荷  $L_1$ ,  $L_2$  を 400W と 250W のアンバランス状態とし、中性線を不導通として行った。図 4-10 に検証結果を示す。同図(a)のダイオード転流回路が無い中性線欠相保護付き漏電遮断器では、投入から過電圧検出、遮断まで 0.3 秒以上掛かり、その間負荷  $V_{L2-N}$  には最大 172V



(a) ダイオード転流回路無し (b) ダイオード転流回路有り

図 4-10 中性線欠相保護付き漏電遮断器に取付けた場合の効果

Fig. 4-10 Comparison of residual current operated circuit breaker with neutral line protected

の過電圧が印加された。一方，提案するダイオード転流回路を取付けると，検出から遮断までは 0.05 秒と短く，かつ負荷側の電圧は  $V_{L1-N}$ ， $V_{L2-N}$  共に 100V であった。

このようにダイオード転流回路は，接触不良を検出し漏電遮断器を開放させるまでの間も，負荷機器に印加される異常電圧を抑え 100V に維持することができる。

## 4.6 超音波とダイオード転流回路を組合せた接触不良検出

### 4.6.1 両手法の評価

開閉器接点の接触不良には，第 2 章で述べたように接触抵抗値が低くテスターでは発見できない辛うじて導通している接触不良接点と，開閉器操作直後に発生する不導通などの接触不良がある。そこで第 3 章において，辛うじて導通している接触不良接点を超音波で検出する手法を提案し，その有効性を検証した。しかし，超音波を使用した手法では数十 A 以上の電流領域の検出や開閉器操作直後の接触不良の検出は困難であった。そのため本章では，開閉器操作直後の接触不良をダイオード転流回路で検出する手法を提案し，その実用性を検証した。このダイオード転流回路を用いた検出は，ダイオードの飽和電圧特性を利用して接触不良検出を行うのため，検出可能な接触抵抗値は飽和電圧に左右されるが，数十 A 以上の電流領域でも検出は可能である。しかし，辛うじて導通している接触不良接点の検出は難しい。一方，ダイオード転流回路は接触不良に伴って発生する異常電圧の印加を防止する機能も併せ持っている。

表 4-4 超音波とダイオード転流回路法の評価

Table 4-4 Evaluation of ultrasonic wave and diode commutation circuit method

検出手法	メリット	デメリット	評価
超音波	・抵抗値の低い接触不良を検出可能	・硬い試料の接触不良および開閉器操作直後の接触不良は検出困難 ・負荷電流が数十 A 以上の領域は検出困難	・使用目的を小容量の開閉器に限定すれば、一般家庭の定期点検に有用
ダイオード 転流回路	・試料の性質に依存しない ・開閉器操作直後の接触不良を検出可能 ・数十 A 以上の電流領域でも検出可能 ・負荷機器への異常電圧の印加を防止	・抵抗値の低い接触不良は検出困難	・開閉器操作直後の接触不良を検出でき、負荷機器への異常電圧印加も防止可能

表 4-4 にそれぞれの手法のメリット、デメリットおよび評価を示す。接点の接触不良検出を行う超音波とダイオード転流回路には、それぞれメリット・デメリットがあるが、各々のデメリットについては表に示す通りもう一方の手法により補うことが可能である。したがって両手法を組み合わせることで、開閉器操作前と操作直後の接触不良を安全、かつ確実に検出することができる。以下に実際の検出手法を述べる。

#### 4.6.2 検出フロー

開閉器接点の接触不良には、辛うじて導通している接触不良接点と開閉器操作直後に発生する接触不良があることから、超音波とダイオード転流回路を組み合わせることで接触不良の大半は検出可能である。表 4-5、図 4-11 に配線用遮断器における接触不良の検出手順とフロー、表 4-6、図 4-12 に漏電遮断器における検出手順とフローをそれぞれ示す。配線用遮断器と漏電遮断器の検出手順は基本的に同じであるが、漏電遮断器の方は漏電検出用 CT により自動遮断されるところに特徴がある。

表 4-5 配線用遮断器における検出手順

Table 4-5 Detection procedure in case of mold case circuit breaker

フロー	内 容
準備	ダイオード転流回路，電圧測定端子を中性線に接続し，超音波振動子を電源側電線接続端子に当てる。
検出 1	超音波出力を 0～10W まで徐々に印加し，印加前と印加中の電圧差を見る。電圧が増大あるいは減少するようであれば，接点は接触不良と判断し，直ちに開放し点検を行う。
検出 2	遮断器投入時，ダイオード両端電圧 $V_D$ に飽和電圧 $V_s(0.9V)$ 相当が現われれば，接点は接触不良と判断する。
検出 3	最後に再び超音波を徐々に印加し，印加前と印加中の電圧差から，接点の接触不良を判断する。

表 4-6 漏電遮断器における検出手順

Table 4-6 Detection procedure in case of residual current operated circuit breaker

フロー	内 容
準備	ダイオード転流回路，電圧測定端子を中性線に接続し，超音波振動子を電源側電線接続端子に当てる。
検出 1	超音波出力を 0～10W まで徐々に印加し，印加前と印加中の電圧差を見る。電圧が増大あるいは減少するようであれば，接点は接触不良と判断し，直ちに開放し点検を行う。
検出 2	遮断器投入と同時に自動的に開放されるときは，接点は接触不良と判断する。なお，ダイオードに流れる電流が漏電検出用 CT の感度未満の場合は検出しない。
検出 3	ダイオード両端電圧 $V_D$ に飽和電圧 $V_s(0.9V)$ 相当が現われるときは，接点は接触不良と判断する。
検出 4	最後に再び超音波を徐々に印加し，印加前と印加中の電圧差から，接点の接触不良を判断する。



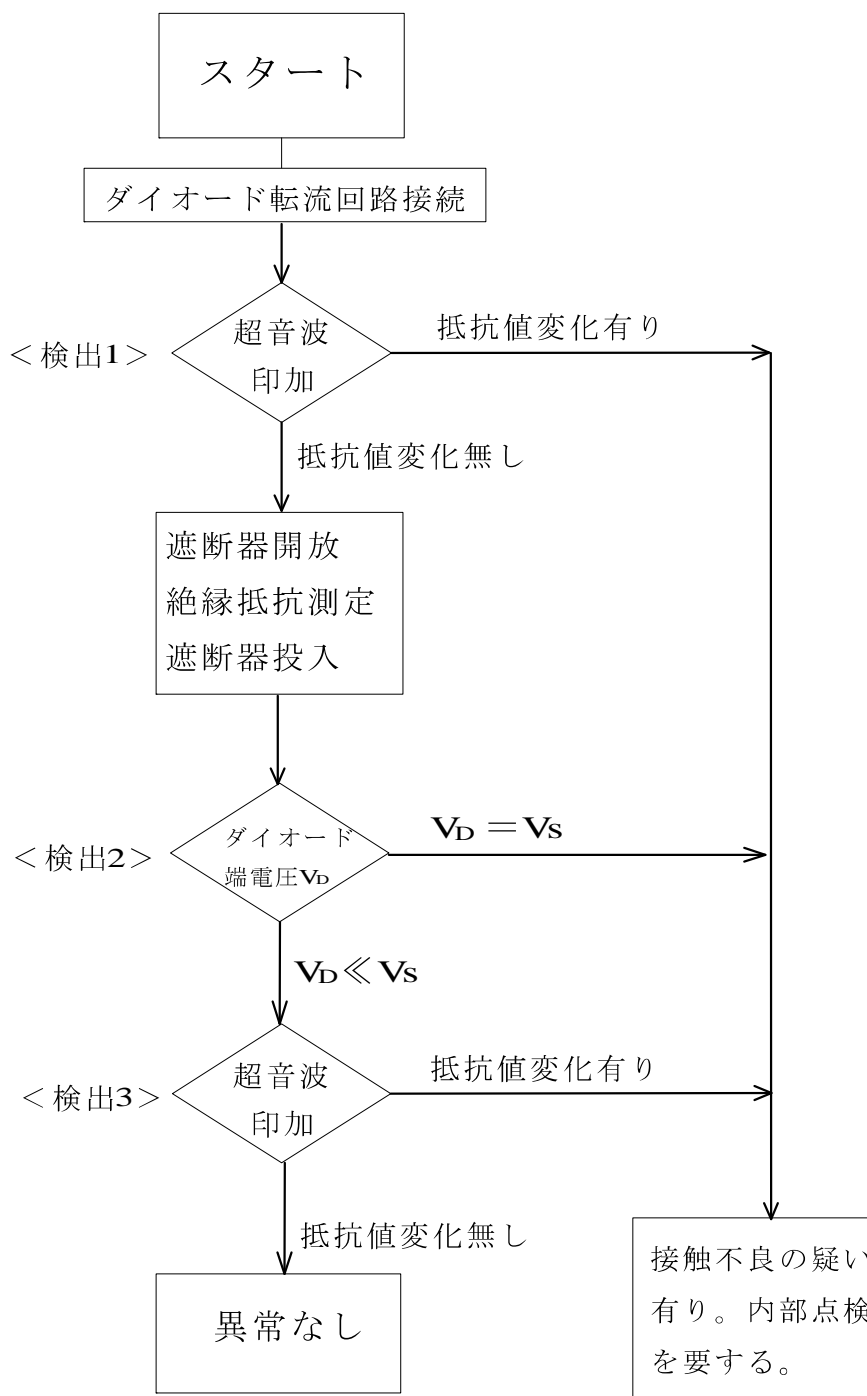


図 4-11 配線用遮断器における検出フロー

Fig.4-11 Detection flow in case of mold case circuit breaker

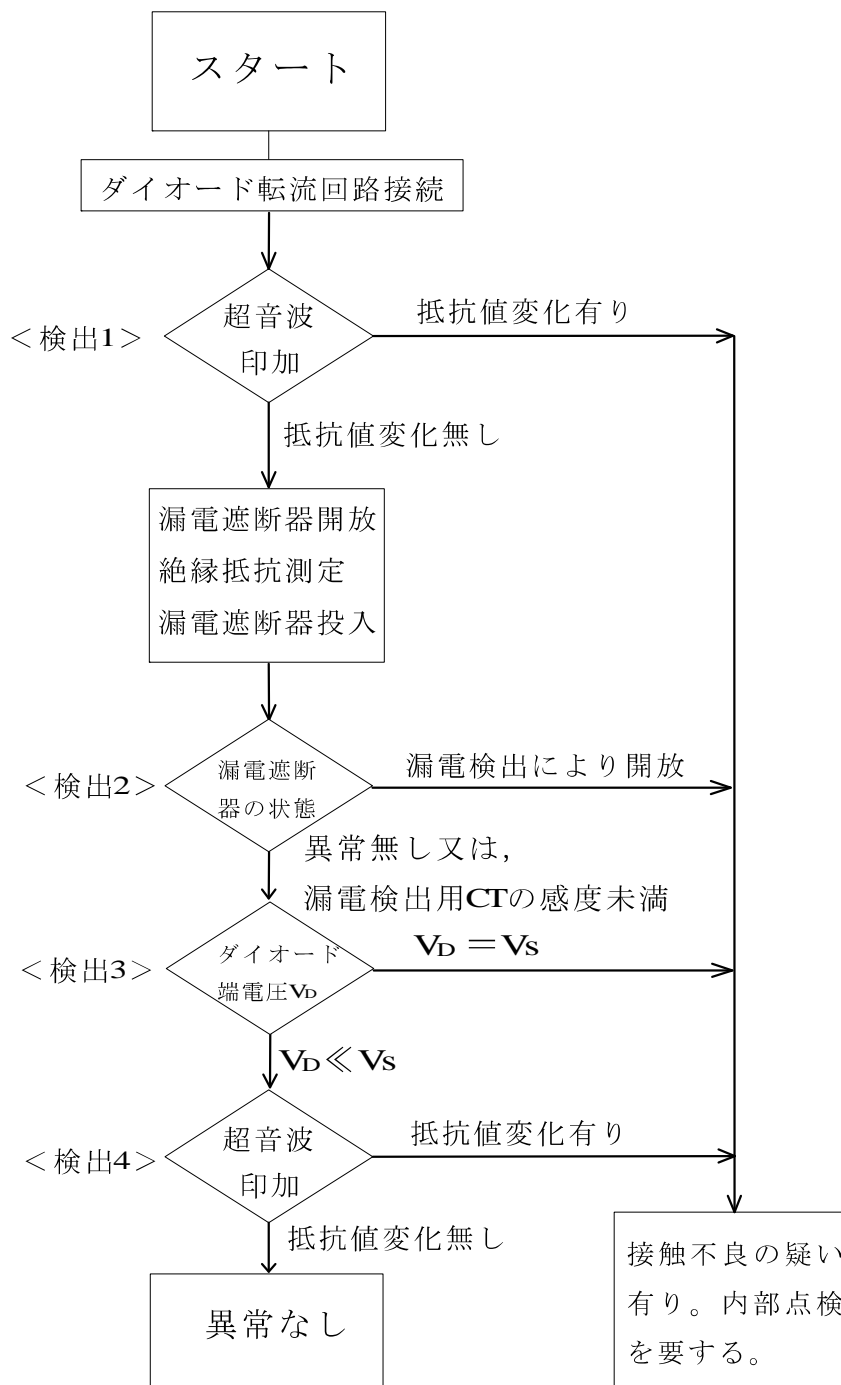


図 4-12 漏電遮断器における検出フロー

Fig.4-12 Detection flow in case of residual current operated circuit breaker

## 4.7 結言

本章では、ダイオード転流回路による低圧開閉器接点の接触不良検出法の提案と100/200Vの実負荷による実用性の検証を実験的に行った。実験は単相3線式回路に3kW程度の負荷を接続し、0~30A領域までの実用性を検証し、検出レベルを明らかにした。また、漏電遮断器の漏電検出機能を用いた接触不良検出についても実験的に検証を行った。さらに、開閉器接点の接触不良に伴って生じる異常電圧をダイオード転流回路により防止する手法についても検証を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) ダイオード転流回路による低圧開閉器の接触不良検出は、ダイオード両端に現れる波形が、正弦波であれば良好、方形波状であれば接触不良と診断する手法で、検出までの間は、負荷機器に異常電圧を与えない。
- (2) ダイオード転流回路による接触不良検出は、通電電流1A以上であれば1Ω以上の接触抵抗を確実に検出できる。また、1A以下であってもダイオード両端の電圧は1V以下であるため、負荷機器に異常電圧を与えない。
- (3) 開閉器が漏電遮断器の場合、遮断器投入直後の開放動作により、1Ω以上の接触抵抗を検出できる。
- (4) 開閉器接点の接触不良により負荷機器へ印加される異常電圧は、ダイオード転流回路の使用により確実に防止できる。
- (5) 超音波とダイオード転流回路を組み合わせることで、開閉器操作前と操作直後の接触不良を安全にかつ確実に検出することができる。

本手法の最大の特徴は開閉器操作直後の接触不良を検出し、開閉器の投入から開放までの間も負荷側に掛かる電圧を $101 \pm 6V$ など規定電圧以内に保つものである。実際の検出レベルはダイオードの飽和電圧 $V_s$ の値によって決まるが、今回使用した1V前後のダイオードを使用すれば、1Ω以上の接触抵抗の検出は可能であり、異常電圧の印加も確実に防止できる。

以上の通り、ダイオード転流回路と超音波による検出手法を組み合わせることで、低圧開閉器の辛うじて導通している接触不良接点と開閉操作直後の接触不良を確実に検出でき、その有効性も確かめられた。

#### 第4章 参考文献

- (1) 原英喜, 中村光一: “超音波とダイオード転流回路を用いた低圧開閉器の接触不良検出法の提案”, 電気学会論文誌 B, 121 巻 3 号, pp.413-414 (2001)
- (2) 原英喜, 中村光一: “一般家庭における低圧遮断器接点の接触抵抗とジュール熱”, 電気設備学会誌, Vol.21, No.12, pp.1031-1032 (2001)
- (3) 三菱電機(株): “三菱ノーヒューズ遮断器”, 三菱電機技術資料, pp.44-45 (1998)
- (4) 松下電工(株): “盤用ブレーカ”, 松下電工商品カタログ, pp.208-209 (1999)
- (5) 日東工業(株): “日東ブレーカ”, 日東工業商品カタログ, pp.30-31 (1997)
- (6) 原 英喜, 鶴飼裕之, 中村光一: “ダイオード転流回路を用いた低圧開閉器接触不良検出と異常電圧印加防止”, 平成 15 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.373-374 (2003)
- (7) 日本電気協会需要設備専門部会: “内線規程 JEAC8001”, (社)日本電気協会, pp.119-129 (2005)

## 第 5 章

# 高調波重畳による電源端からの接触不良検出

### 5.1 緒言

本論文の第 3 章、第 4 章において、低圧開閉器接点の接触不良検出について述べた。第 3 章では超音波を用いて、辛うじて導通している接触不良接点を通電状態で検出する手法を、第 4 章ではダイオード転流回路を用いて、開閉器操作直後の接触不良を検出する手法を提案した。しかし、何れの手法も低圧開閉器が設置してある場所での検出法であり、電路に複数台開閉器がある場合は点検時間が必要となってくる。とくに低圧開閉器のある電路には、20A の小容量から数百 A の開閉器まで様々な容量の開閉器が設置されており、また、接触不良には開閉器接点の他に電線接続端子の緩みなどもあることから、提案する両手法を全ての開閉器に適用して検査するのは、作業量的に難しい。

ところで、低圧電路の絶縁状態の監視は、変圧器 B 種接地線に流れる漏洩電流で、電路の絶縁状態を常時監視している。そこで、低圧電路の接触不良診断についても絶縁監視と同様に、低圧電路電源端にて常時一括監視することは設備の予防保全に繋がり、保守点検業務の効率化に大きく寄与するものである。

本章では、低圧電路電源端からの接触不良検出の可能性について、実験結果を基に検討する。文献によれば開閉器端子などが接触不良を起こすと、接触不良個所の電圧波形は歪波形となり高調波成分が発生している<sup>(1)(2)</sup>。この高調波成分は小さいため、電源端からの測定では接触不良を検出できない。そこで、電源端から高調波を重畳させて接触不良を検出する可能性について検討する。実験は市販開閉器の端子を緩めて接触不良状態を模擬し、電源端の電圧・電流波形をそれぞれ周波数解析し、高調波の発生次数を分析した。そして、低圧電路電源端から高調波を重畳させ、電源端から見た高調波インピーダンスの絶対値の変動傾向から、電路内の接触不良個所を検出する手法について述べる。

## 5.2 接触不良と高調波の発生

### 5.2.1 実験概要

#### (1) 実験回路

図 5-1 に実験回路を示す。電源と負荷の間に 3P30A の開閉器を接続し、電源側端子を接触不良個所とした。電源はノイズの影響を少なくするために、周波数発振器(F.S.)と電力増幅器(Amp.)を用いて 100V/60Hz, 2kVA とした。高調波は周波数発振器で 60Hz の基本波に第 2 次・第 3 次高調波成分を加算して重畳させた。また、一般家庭の日中の負荷電流は 5A 以下が多いことから<sup>3)</sup>、使用した負荷機器は約 500W 分の白熱電球とした。実験で用いた測定器などは、高調波の発生の無いものを選定した。表 5-1 に測定器の仕様を示す。

#### (2) 実験方法

接触不良は図 5-2 に示すように開閉器の電源側端子を緩め、乾燥野草を挟み込み模擬した。なお、ネジの締め付け状態は、正常な状態は開閉器メーカー指定の適正トルク(2.0N・m)で締め付け、緩めた状態は適正トルクの状態から 1 回転緩める状態とした。

測定は電源の電圧・電流、開閉器端子間の電圧および負荷側の電圧をデジタルオシロスコープでそれぞれ記録した。測定回数は正常な状態、接触不良状態とも各 3 回とした。

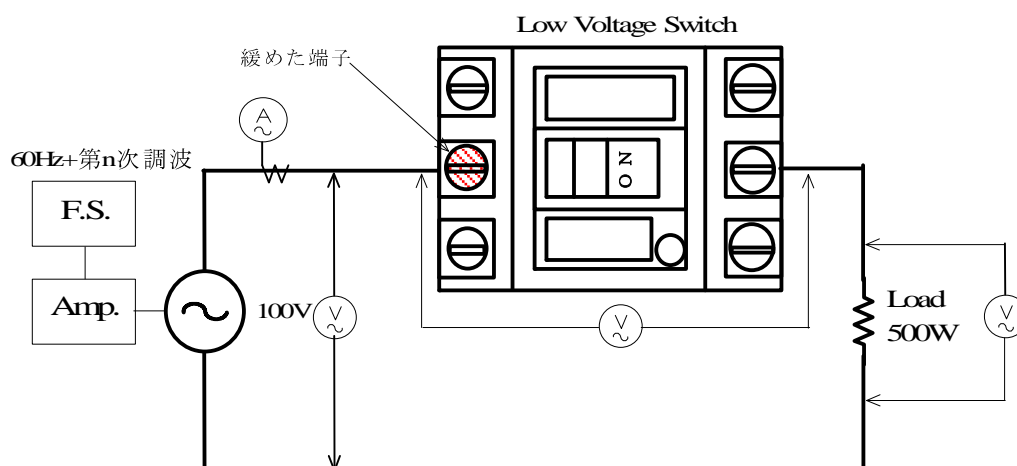


図 5-1 高調波重畳実験回路

Fig.5-1 Harmonics experiment circuit

表 5-1 使用測定器仕様

Table 5-1 Specification of measuring instrument

名 称	型 式	定 格	製造者
ファンクションシミュレータ <sup>®</sup> (F.S.)	WF1966	2ch,0-50MHz	エヌエフ回路設計フ <sup>®</sup> ロック
電力増幅器(Amp.)	4520	2kVA,16.7A	エヌエフ回路設計フ <sup>®</sup> ロック
デジタルオシロスコープ	WE7111	4ch,100MS/s	横河電機
トルクドライバー	RTD500CN	1~5N・m	東日製作所



図 5-2 接触不良端子の様子

Fig.5-2 Appearance of poor contact terminal

## 5.2.2 実験結果

### (1) 接触不良と波形歪み

図 5-3 に正常な状態と接触不良状態における電源側の電圧・電流，開閉器端子間および負荷側電圧の波形例を示す。正常な状態では何れの波形も正弦波状をしている。一方，接触不良状態では，同図(c)に示す端子間の電圧波形は左右非対称の歪み波形となっている。

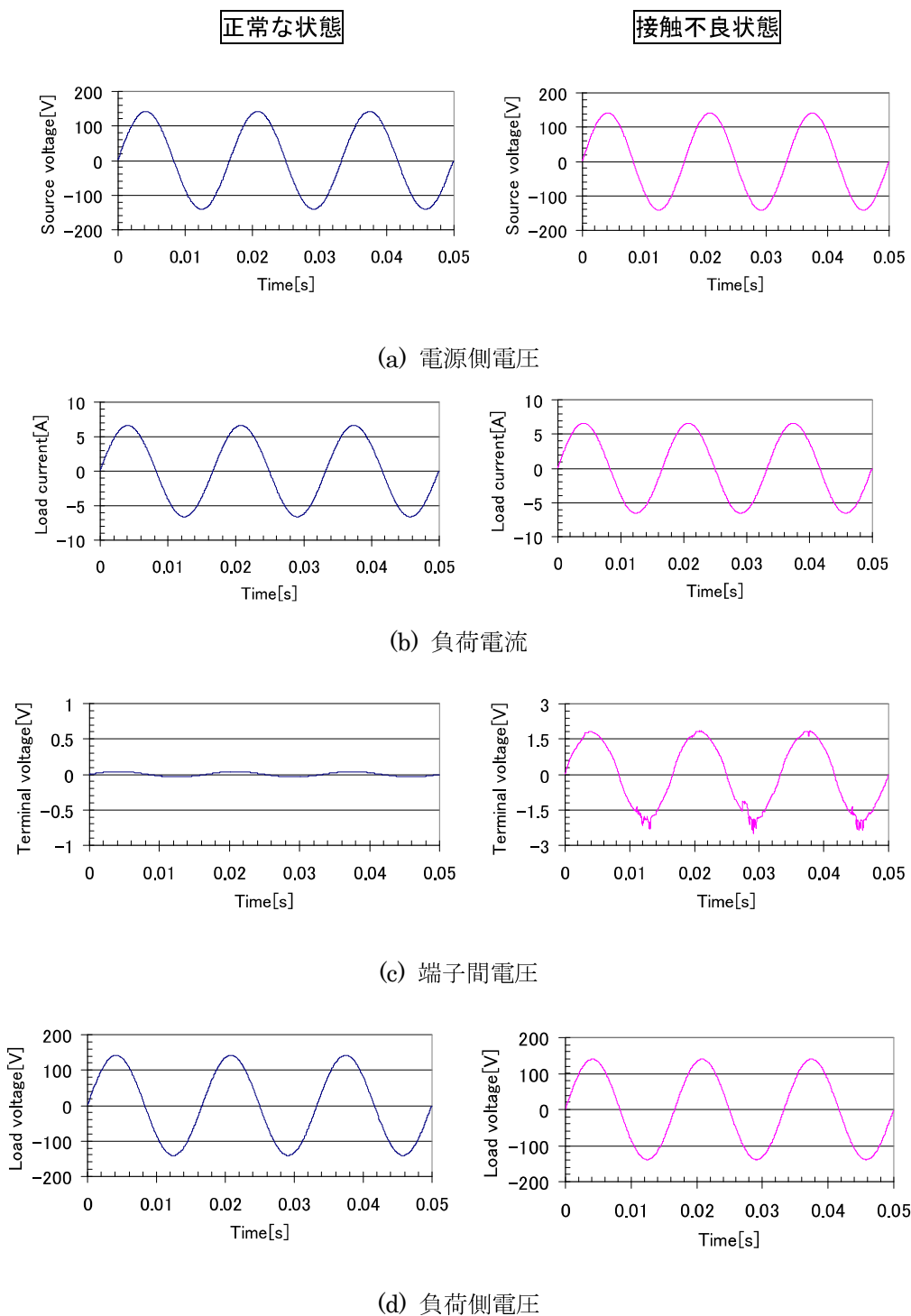


図 5-3 正常な状態と接触不良状態の電圧・電流波形

Fig.5-3 Waveform of normal contact and poor contact



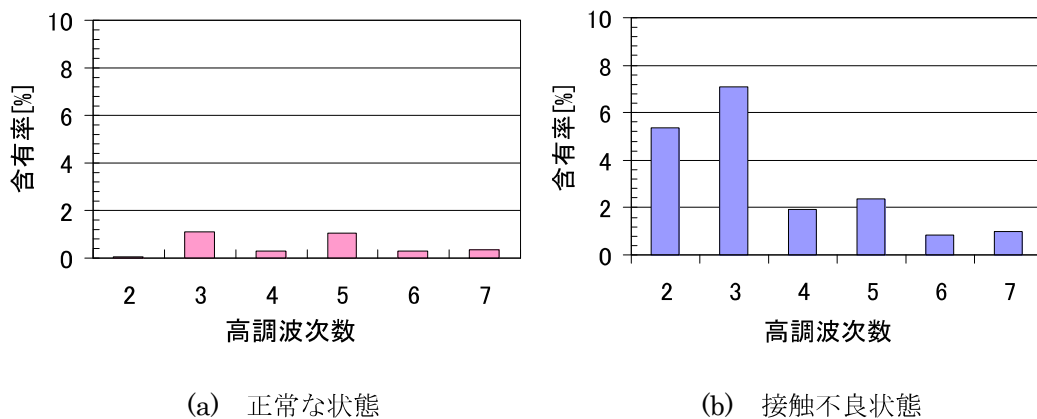


図 5-4 開閉器端子間の高調波含有率

Fig.5-4 Harmonics content of switch terminal

## (2) 接触不良による高調波の発生

図 5-4 に図 5-3(c)の開閉器端子間の電圧波形を周波数解析した結果を示す。正常な状態では、何れの高調波次数も 2%以下であったが、接触不良状態では第 2 次，第 3 次の高調波含有率が高く，第 2 次で 5.3%，第 3 次は約 7%であった。

以上の結果より，接触不良箇所からは第 2 次，第 3 次高調波成分が顕著に発生していることが明らかとなった。即ち，低圧電路においてこの高調波成分を検出することで，電路内の接触不良を検出できる可能性がある。

## 5.3 高調波重畳による接触不良検出

実験では接触不良個所の電圧波形は大きく歪み，第 2 次，第 3 次高調波が発生している現象が明らかとなった。しかし，この時の電源端の電圧・電流波形から高調波成分を検出してもその大きさは小さく，また，絶対値だけでは接触不良か否かの判別は難しい。そこで，低圧電路の電源端から高調波を重畳させ，電源端から見た高調波インピーダンスの変化から接触不良を検出する可能性について，実験結果を基に類推する。

### 5.3.1 電源端からの高調波重畳実験

#### (1) 実験方法

図 5-1 の実験回路で，60Hz の基本波成分に第 2 次，第 3 次高調波成分をそれぞれ重畳させ，電源端の電圧・電流，開閉器端子間および負荷側の電圧をデジタルオシロスコープで

記録した。なお、接触不良の模擬は 5.2.1 節と同一とした。

実験は正常な状態と接触不良状態で電源端から高調波成分を重畳させた。重畳する高調波の含有率は、基本波成分の 0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10%とし、高調波インピーダンス  $Z_n$  の算出は、電源端の電圧と電流の第  $n$  次成分を(5-1)式により求めた。なお、負荷機器からの発生している高調波電流  $I_L$  については、正常な状態における高調波重畳前(0%時)に流れている電流とし、 $Z_n$  の算出からは除去している。

$$Z_n e^{j\theta} = \frac{V_n e^{j\theta_1}}{I_n e^{j\theta_2}} \quad (5-1)$$

## (2) 実験結果

図 5-5 に第 2 次・第 3 次高調波をそれぞれ重畳した時における電源端から見た第 2 次高調波インピーダンス  $Z_2$ 、第 3 次高調波インピーダンス  $Z_3$  の実験結果を示す。同図(a)は  $Z_2$  の絶対値を示し、高調波を徐々に重畳していくと接触不良状態の  $Z_2$  は 16Ω 前後から増加し、含有率 1%付近から 21Ω に落ち着く様相であった。一方、正常な状態では高調波重畳にも関わらず約 21Ω 一定であった。

同図(b)は  $Z_3$  の絶対値を示し、正常な状態と接触不良状態とも 21Ω 前後を変動したが、 $Z_2$  のような高調波重畳による大きな変動は無かった。

また、高調波重畳前の回路内の高調波電流  $I_L$  は、正常な状態で第 2 次は 0.0073A、第 3 次は 0.0136A であった。

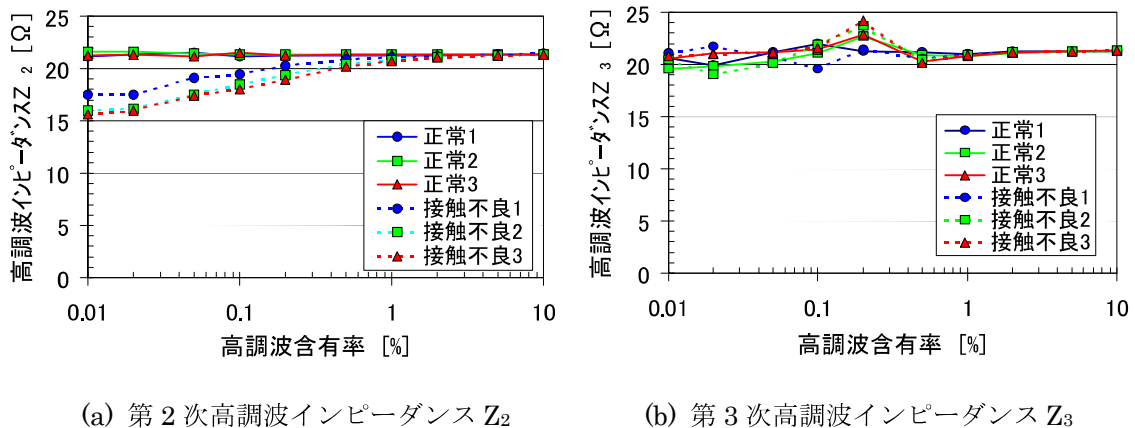


図 5-5 電源端から見た高調波インピーダンス

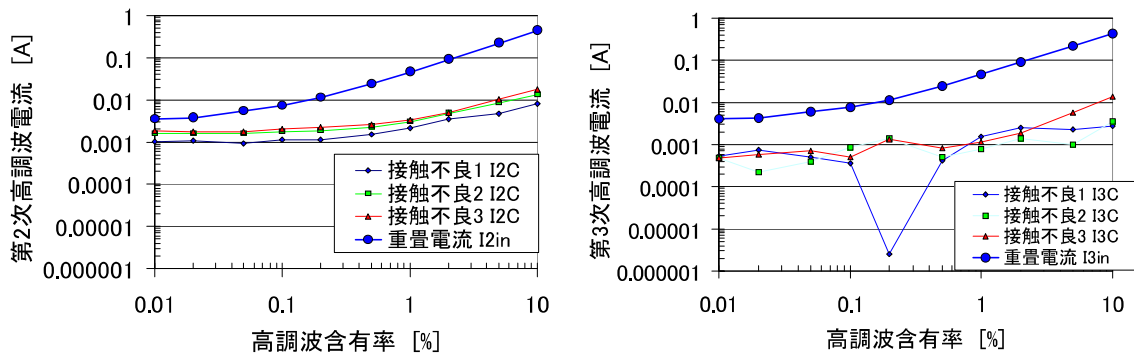
Fig.5-5 Harmonics impedance

### 5.3.2 考察とインピーダンス等価回路

#### (1) 第2次高調波インピーダンス $Z_2$ の等価回路

図 5-5(a)の結果より，正常な状態の  $Z_2$  は高調波重畳に関わらず一定であることから，電路は開閉器の内部抵抗と負荷抵抗から構成される。

一方，接触不良状態における  $Z_2$  は  $16\Omega$  から  $21\Omega$  に変化したことから，電路内に高調波電流の発生源があると考えられる。そこで，同図(a)の結果を基に，電路内で発生している高調波電流分  $I_{2c}$  を算出する。算出は高調波重畳によって流れる電流を  $I_{2in}$  とし，接触不良状態の測定値から  $I_{2in}$  を除去し求めた。図 5-6(a)に接触不良 3 回の  $I_{2c}$  と  $I_{2in}$  を示す。図より何れの接触不良個所からも第2次高調波電流  $I_{2c}$  が発生しており， $I_{2in}$  に対する比  $I_{2c}/I_{2in}$  は， $1/2$  倍から高調波重畳に伴い  $1/33$  倍となっていた。即ち，この  $I_{2c}$  の存在が  $Z_2$  を  $16\Omega$  に下げた要因であり，含有率 1%付近から  $21\Omega$  一定になった理由と考えられる。

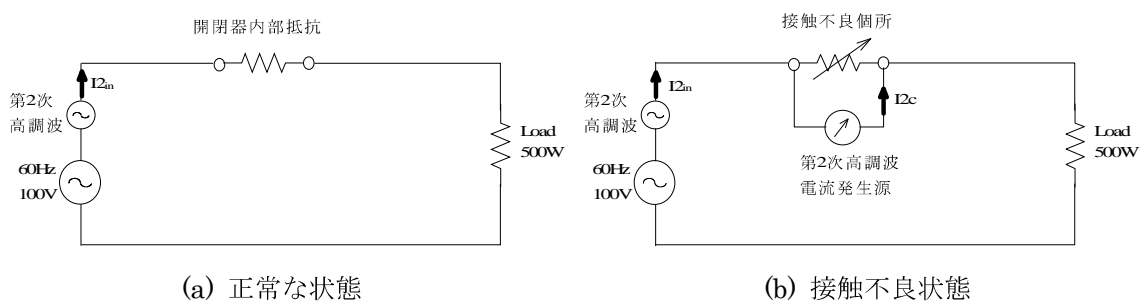


(a) 第2次高調波電流

(b) 第3次高調波電流

図 5-6 接触不良個所からの高調波電流

Fig.5-6 Harmonics current at poor contact



(a) 正常な状態

(b) 接触不良状態

図 5-7  $Z_2$  の等価回路

Fig.5-7 Equivalent circuit of  $Z_2$

これらを  $Z_2$  の等価回路として整理すると図 5-7 に示す回路となる。正常な状態の  $Z_2$  は、同図(a)に示すように回路に高調波発生源が無いシンプルな回路になる。一方、接触不良状態では同図(b)に示すように接触不良個所と並列に高調波電流源があることになる。

## (2) 第 3 次高調波インピーダンス $Z_3$

図 5-5(b)の結果より、正常な状態も接触不良状態も高調波重畳による  $Z_3$  の大きな変動は無かったことから、接触不良時の回路には高調波発生源が無いと予想される。しかし、 $I_{2C}$  と同様に  $I_{3C}$  を算出したところ、図 5-6(b)に示すように  $I_{2C}$  の 1/3 程度が発生していた。

この  $Z_3$  が変動しない原因は明確ではないが、負荷機器や電源から発生している第 3 次高調波電流  $I_L$  が第 2 次の 2 倍近くあり、接触不良個所からの第 3 次高調波電流  $I_{3C}$  は上記の通り小さい。そのため、測定値から負荷機器の高調波電流  $I_L$  を除去し  $Z_3$  を算出する際、接触不良個所からの  $I_{3C}$  が小さいために測定誤差として計算され、接触不良個所の  $Z_3$  として現れなかったと考えられる。

### 5.3.3 接触不良判別の可能性

一般家庭の負荷機器から発生する高調波は、第 3 次、第 5 次など奇数調波が多い<sup>(4)</sup>。そのため、第 3 次の高調波重畳による接触不良の検出では、正常な状態でも高調波の発生量が多く、 $Z_3$  の変動傾向も接触不良状態と同じであることから、 $Z_3$  の絶対値から判別するのは難しいと考えられる。

一方、今回注目した第 2 次の高調波重畳による判定は、電源端から見た  $Z_2$  の絶対値の差だけでも  $5\Omega$  前後あり、 $Z_2$  の変動傾向も正常な状態と異なることから、接触不良個所を検出できる可能性がある。

## 5.4 結言

本章では、開閉器の接点や端子などの緩みによる接触不良個所を低圧回路の電源端から検出する手法について述べた。実験は開閉器の端子を緩め接触不良を模擬させた状態で、電源端から高調波を重畳させ、電圧・電流波形の周波数解析を行った。その結果、端子が接触不良状態ではその電圧波形は大きく歪み、高調波成分が現れることを実験的に明らかにした。そして、電源端に高調波を重畳させることで、正常な状態か接触不良状態なのかを判別できる可能性について報告した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 開閉器端子などが接触不良状態になると、その端子間の電圧波形は歪み波形とな

- り，第 2 次，第 3 次の高調波成分が顕著に現れることを明らかにした。
- (2) 電源端から第 2 次高調波を徐々に重畳していくと，接触不良個所がある場合，電源端から見た第 2 次高調波インピーダンスの絶対値は数  $\Omega$  の変動傾向にあり，接触不良を検出できる可能性がある。

本手法は実験結果を基に検討したため，必ずしも確定的ではないが，さらにデータを集めて定性的に提言できるよう検討する必要がある。

## 第 5 章 参考文献

- (1) 愛知久史, 佐土根範次, 松村年郎, 鬼頭幸生, 向山翼, 高木勲: “SF<sub>6</sub> 分解生成物が介在した銅点接触子の交流電流通電特性に関する実験的考察”, 電気学会論文誌 B, 111 巻 5 号, pp.562-569 (1991)
- (2) 松井彰: “低圧電路および開閉器接触不良検出法に関する研究”, 名古屋工業大学修士論文, pp.43-63 (2005)
- (3) 原英喜, 中村光一: “一般家庭における低圧遮断器接点の接触抵抗とジュール熱”, 電気設備学会誌, Vol.21, No.12, pp.1031-1032 (2001)
- (4) 蛭間淳之, 古川登, 落合政司, 神谷文夫, 野田臣光, 田中淳之: “機器の電源高調波抑制対策技術”, OHM, 3 月号, pp.56-58 (2002)

## 第 6 章

# 高圧需要家における進相コンデンサ容量の 適正化と電圧上昇の抑制

### 6.1 緒言

一般家庭など 100/200V の低電圧で供給される場所では、低圧開閉器の接点や端子の接触不良により通常より高い異常電圧が発生することがあり、本論文の第 2 章から第 5 章にかけて、その実態と検出方法および異常電圧印加の防止法について報告した。

この低圧設備への電圧の安定供給には、上位系統の安定も必要である。とくに 6,600V の高圧配電線路には高圧で受電する需要家が多数接続されており、需要家内における事故・故障による停電波及や過剰な進相コンデンサによる電圧上昇などは、低圧需要家へ直接影響を与えかねない。中でも電圧の上昇は機器に過電圧を与えることとなり重要な問題となっている。

一般に高圧需要家には電気料金の力率割引を最大限受けるために、力率改善用の進相コンデンサが設置されている。その容量は一般に三相変圧器容量の 3 分の 1 程度とされてきた。この「3 分の 1」の根拠は、「負荷力率 85%を 95%に改善するために必要な容量」と言われている<sup>①</sup>。しかし、今日の Hf 蛍光ランプや正弦波 PWM コンバータ<sup>②③</sup>などに見られるデジタル機器の力率は 100%に近い。また、需要家の負荷力率は 90%以上という調査・報告もあり<sup>④</sup>、そのような場合、元来のいわゆる「3 分の 1」ルールをそのまま適用するとコンデンサ容量が大き過ぎることになる。それに加えて、需要家によっては、進相コンデンサは常に接続したままになっており、夜間・休日などの軽負荷時間帯では、系統全体が進相特性となっているケースが多い。したがって、これら時間帯では、フェランチ効果により受電電圧が上昇する傾向にあり、末端の需要家ほどその影響は大きい<sup>⑤</sup>。

本章では、中部電力管内にある高圧需要家 6,000 軒の進相コンデンサ容量と自動力率調整装置(APFC)導入の実態調査を行い、変圧器容量別のコンデンサ容量と自動調整している高圧および低圧コンデンサ容量の実態を明らかにした。また、高圧需要家 25 軒の受電点に

おける力率測定を行い，需要家設備の負荷力率の推定と適正なコンデンサ容量について検討を行った。さらに，高圧需要家に自動力率調整装置が導入された場合における配電系統の電圧上昇と電圧変動の抑制について，簡単なシミュレーションモデルを用いて検証した。

## 6.2 進相コンデンサ設備の実態調査

### 6.2.1 コンデンサ容量の実態<sup>(6)</sup>

#### (1) 調査内容

調査は中部電力管内で高圧受電する需要家について行った。調査内容は次の通りである。

- ① 対象設備：6,600V の受配電設備で電気主任技術者を外部委託している高圧需要家
- ② 調査軒数：6,000 軒
- ③ 調査項目：高圧の進相コンデンサおよび変圧器容量

#### (2) 調査対象の軒数構成比

図 6-1 に 6,000 軒の変圧器総容量(単相変圧器と三相変圧器の合計容量)別の軒数構成比を示す。図から調査対象の 90%以上は 500kVA 以下の比較的小規模な需要設備である。

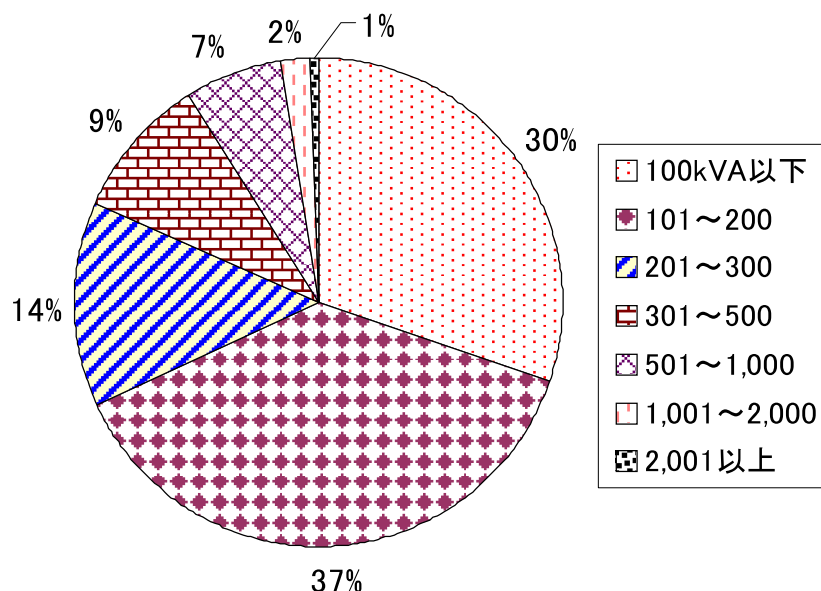


図 6-1 調査対象の設備容量別軒数比

Fig.6-1 Ratio of transformer capacity installed in customer



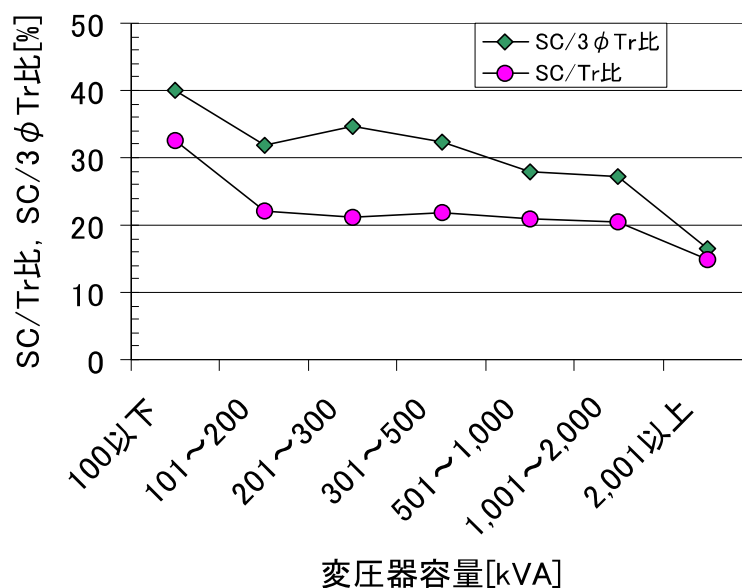


図 6-2 変圧器容量に対するコンデンサ容量比

Fig.6-2 SC ratio versus transformer capacity

### (3) 変圧器容量に対するコンデンサ容量比

図 6-2 に変圧器総容量に対するコンデンサ容量の割合(以下, SC/Tr 比という), 変圧器総容量から単相変圧器分を除いた, 三相変圧器容量に対するコンデンサ容量の割合 (以下, SC/3φTr 比という)の平均値をそれぞれ示す。

図より進相コンデンサの容量は, 100kVA 以下を除けば概ね三相変圧器容量の 30%前後あり, 一般に言われている「3分の1」ルールに近い値となっている。一方, SC/Tr 比, SC/3φTr 比共に, 100kVA 以下が相対的に高いのは, 変圧器容量が小さいとそれに合う適当な容量のコンデンサが無いため, 必要容量以上のコンデンサが設置されたものと考えられる。

## 6.2.2 自動力率調整装置導入の実態<sup>(7)</sup>

### (1) 調査内容

6.2.1 節で調査した高圧需要家 6,000 軒の内, 高圧または低圧の自動力率調整装置を設置している需要家のコンデンサ設備について調査を行った。調査内容は次の通りである。

- ① 調査軒数 : 310 軒
- ② 調査項目 : 自動調整している進相コンデンサの高圧・低圧の電圧区分, 複数バンクある場合の自動調整しているコンデンサおよび調整していないコンデンサの容量(以下, 調整 SC, 固定 SC という)

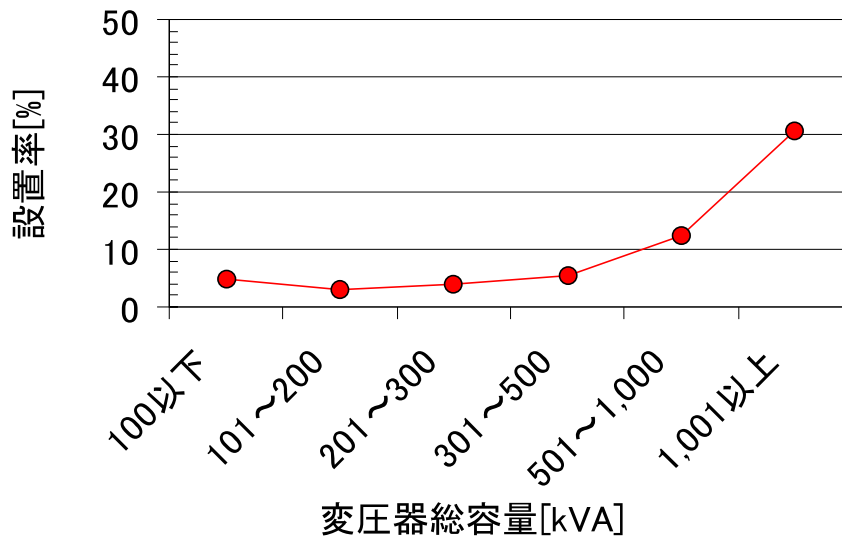


図 6-3 自動力率調整装置の設置率

Fig.6-3 Installation rate of APFC versus transformer capacity

### (2) 変圧器総容量別の設置率

図 6-3 に調査軒数 6,000 軒に対する自動力率調整装置の設置率を変圧器総容量別に示す。全体の平均設置率は 5.2%で、変圧器総容量が大きい需要家ほど設置率は高い。とくに 1,001kVA 以上の需要家では、平均設置率は 30%と 3 軒に 1 軒は設置している。これは、規模の大きい需要家ほどコンデンサ設置の費用が掛かるため、自動力率調整装置の導入により効果的な力率調整を行っているためと考えられる。

### (3) 自動調整しているコンデンサの電圧区分

自動調整しているコンデンサを高圧と低圧に分け、調整 SC と固定 SC 別の軒数比を図 6-4 に、三相変圧器容量別の軒数比を図 6-5 にそれぞれ示す。

図 6-4 より自動力率調整装置を設置している需要家の約 70%は低圧側にコンデンサを設置し、そのほとんどが高圧の固定 SC と組み合わせて自動調整を行っている。

図 6-5 より設備容量が大きい需要家ほど、高圧側にコンデンサを設置して自動調整している。これは容量の大きいコンデンサを設置する場合、低圧側に複数台設置するよりも、高圧側に一括して設置した方が価格面、設置スペースからも導入しやすいためと考えられる。一方、小規模な需要家では、変圧器台数が少ないため低圧側にコンデンサが導入されやすい。

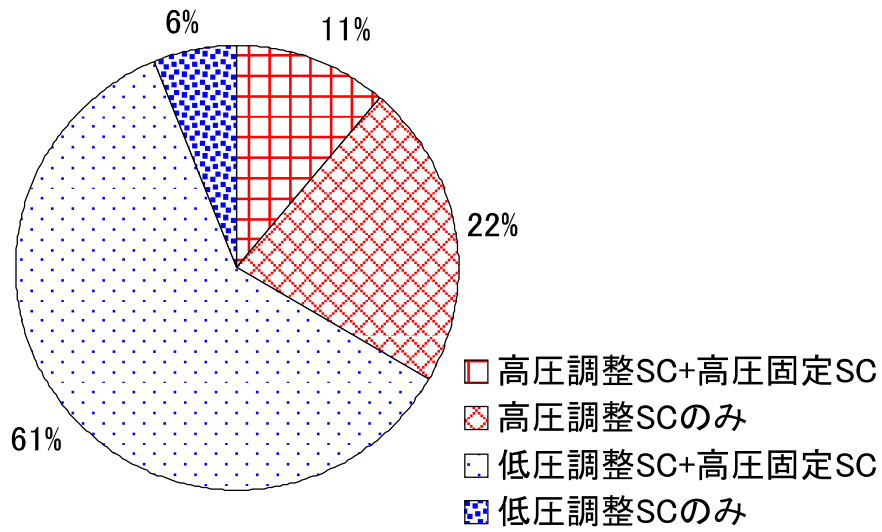


図 6-4 調整 SC の電圧区分別軒数比

Fig.6-4 Combination of regulation SC

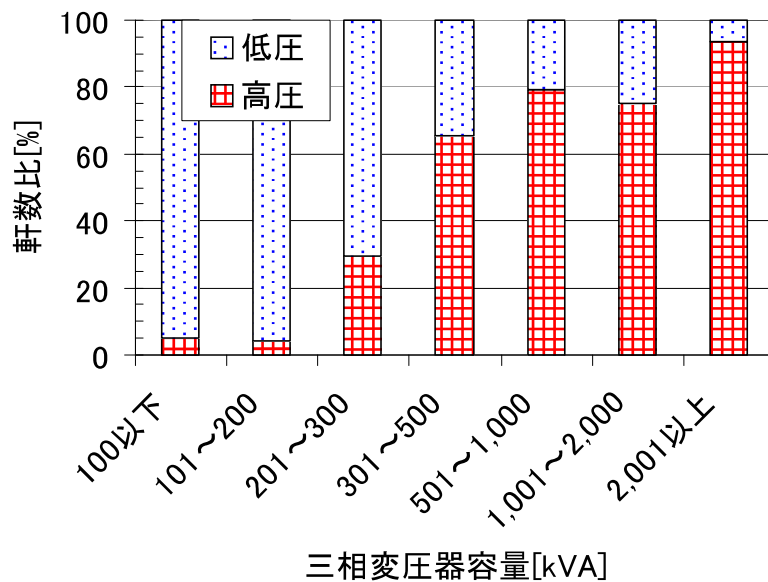


図 6-5 三相変圧器容量別の調整 SC の電圧区分

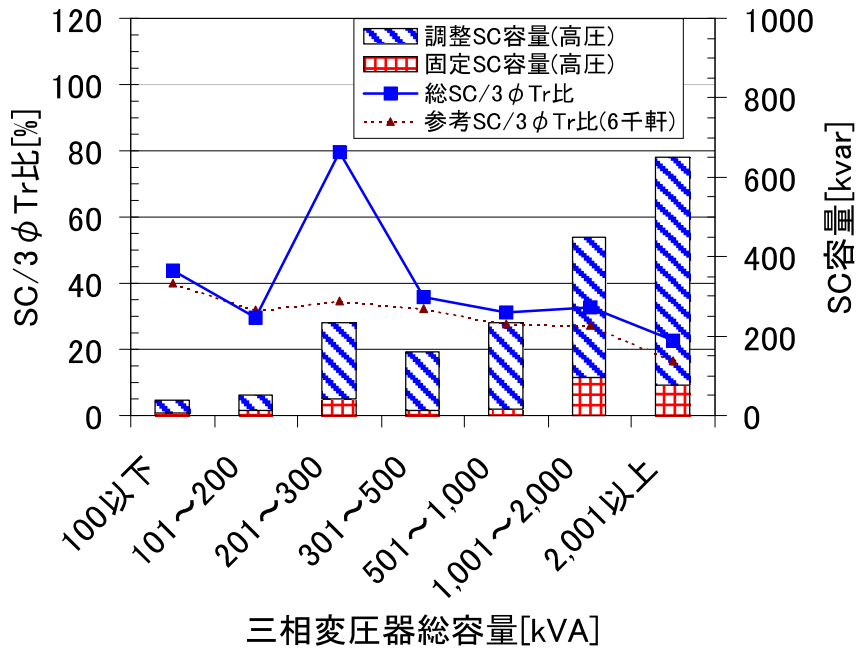
Fig.6-5 Ratio of regulation SC on high voltage or low voltage use

#### (4) 高圧・低圧側で自動調整しているコンデンサ設備

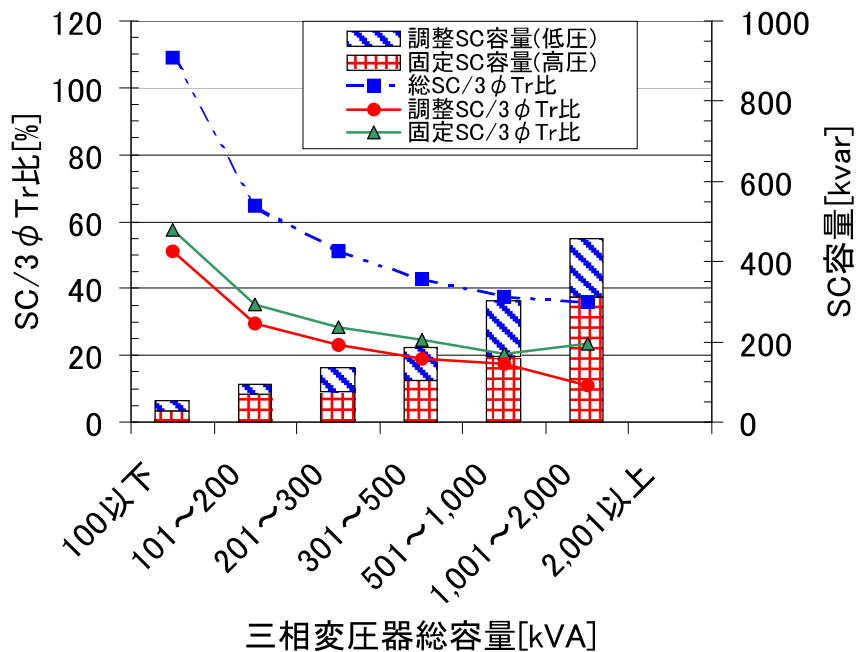
進相コンデンサを高圧または低圧側で自動調整している需要家について、三相変圧器容量別の調整・固定 SC 容量、三相変圧器容量に対するコンデンサ総容量の割合(以下、総 SC/3 $\phi$  Tr 比という)を図 6-6 に示す。

高圧側で自動調整している需要家の総 SC/3 $\phi$  Tr 比は、201~300kVA を除くと概ね 30% 前後で、6.2.1 節で述べた 6,000 軒の SC/3 $\phi$  Tr 比と比較しても大きな差はない。これは、調整 SC と固定 SC の合計値が三相変圧器容量の 3 分の 1 程度になるよう設計していることと言える。なお、201~300kVA の総 SC/3 $\phi$  Tr 比が高い理由は、この区分の中の 1 軒が 300% 近くあったためである。

一方、低圧側で自動調整している需要家の総 SC/3 $\phi$  Tr 比は、高圧時と比べると 40~110% と非常に高い。そこで、総 SC/3 $\phi$  Tr 比を調整 SC と固定 SC に分けて見ると、低圧の調整 SC だけの SC/3 $\phi$  Tr 比は 10~50%、高圧の固定 SC だけでは 20~60%であった。即ち、これは低圧の調整 SC だけで三相変圧器容量の 3 分の 1 程度あるところへ、さらに高圧の固定 SC を設置していることになり、容量選定の「3 分の 1」ルールを超えるケースと言える。



(a) 高圧側で自動調整



(b) 低圧側で自動調整

図 6-6 三相変圧器容量別の調整・固定 SC 容量, SC/3φ Tr 比

Fig.6-6 Capacity on regulation/un-regulation SC and ratio of SC/3φ Tr for three-phase transformer

## 6.3 高圧需要家の力率の実態と適正なコンデンサ容量

### 6.3.1 負荷力率の実態<sup>(8)-(9)</sup>

近年はデジタル機器の普及により需要家設備の負荷力率は良くなってきていると予想される。そこで、製造業や事務所など 6 業種の需要家において、力率測定を行い負荷力率の推定を行った。

#### (1) 測定対象

- ① 規 模：契約電力 約 200kW の小規模高圧需要家  
          契約電力 約 500kW の中規模高圧需要家
- ② 業 種：製造業，事務所，店舗，病院，学校，ホテル
- ③ 測定軒数：25 軒
- ④ 選定条件：各業種には自動力率調整装置を有する需要家を 1 軒以上含めて選定

#### (2) 測定内容

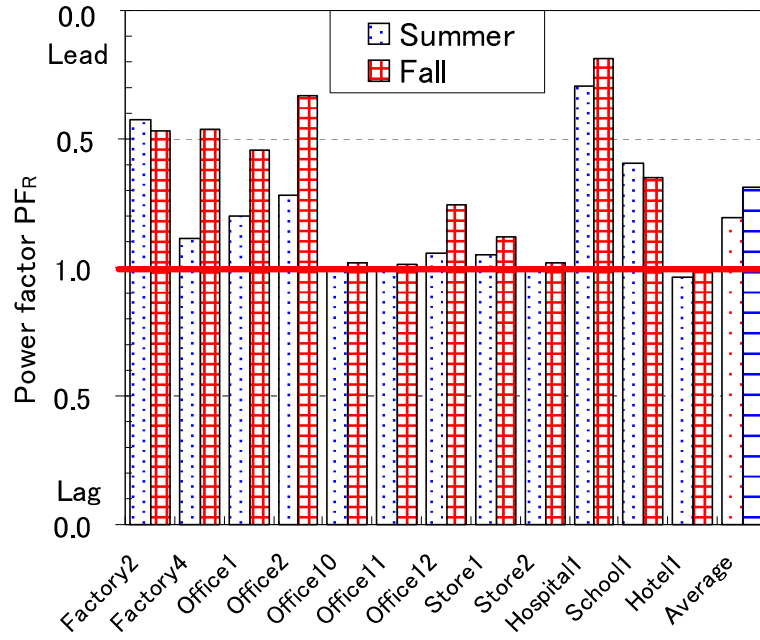
- ① 測定項目：受電点の電圧・電流，有効電力，無効電力
- ② 測定期間：夏季，中間季にそれぞれ連続 2 週間
- ③ 測定間隔：5 分間隔

#### (3) 受電点力率の実態

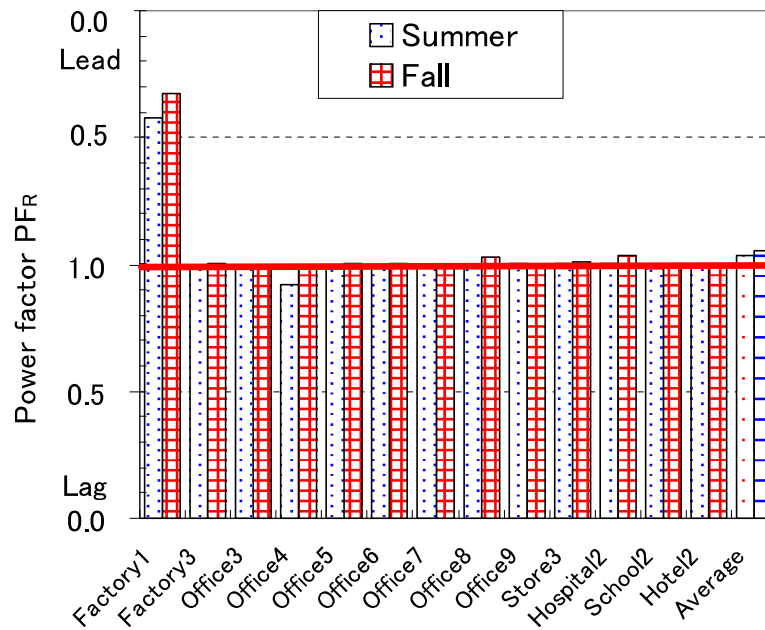
図 6-7(a)に自動力率調整装置を設置していない需要家の受電点力率(PF<sub>R</sub>)，同図(b)に自動力率調整装置を設置している需要家の受電点力率をそれぞれ示す。

自動力率調整装置の無い需要家では，ホテルの 1 軒を除く全てにおいて力率は 1 より進み側であった。これは，需要家に設置された力率改善用の進相コンデンサがその役割を十分果たしているためである。さらにほとんどの需要家で力率が進み側ということは，設置されているコンデンサ容量が大き過ぎることが予想される。

一方，自動力率調整装置を設置している需要家では，製造業の 1 軒を除けば力率はほぼ 1 であり，自動力率調整装置が適正に働き調整されていることが言える。なお，小規模製造業の 1 軒については，低圧側に自動力率調整装置が設置され低圧側の力率は 1 に調整されているが，高圧側にも固定のコンデンサが設置されているため，受電点では大幅な進み力率となっている。



(a) 自動力率調整装置 無し



(b) 自動力率調整装置 有り

図 6-7 高圧需要家の受電点力率

Fig.6-7 PFR of high voltage customer

#### (4) 負荷力率の推定

高圧需要家の受電点力率は、受電点における有効電力Pと無効電力Qから算出している。そこで、Qから設置されているコンデンサ容量(無効電力分)を差し引いた負荷設備の無効電力Q'とPから設備全体の力率の推定を行った。図6-8に25軒分の負荷力率を示す。なお、負荷力率の算出時間は、電力会社の力率割引制度がAM8時からPM10時の平均力率であることから、本稿もそれと同様としている。

図より、高圧需要家の負荷力率は、製造業では平均で0.79であったが、それ以外の業種は2軒を除いて0.9以上で、平均は0.95と高い力率であった。これは文献(2)-(4)に示す通り、今日の負荷力率は非常に良くなってきており、文献(1)の力率85%を95%に改善するということが当てはまらない状況になってきている。よって、コンデンサ容量を一律に三相変圧器容量の3分の1と決めて選定・設置することは、実態に合わないと考えられる。

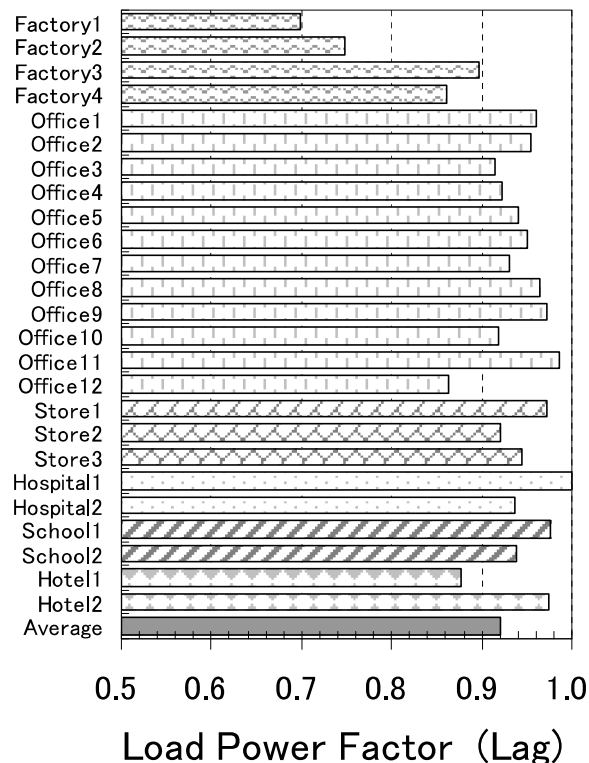


図 6-8 負荷力率の推定

Fig.6-8 Estimation result of load power factor



### 6.3.2 適正なコンデンサ容量<sup>(9)-(10)</sup>

高圧需要家に取付けられる進相コンデンサは、概ね三相変圧器容量の3分の1程度が取付けられ<sup>(5)-(6)</sup>、そのほとんどが自動力率調整装置を設置していないため<sup>(7)</sup>、軽負荷時の配電線は過度の進み力率となっている。この進相コンデンサの設置は電気料金の力率割引を最大限に受けるためであり、その容量は力率割引が最大限に受けられる容量でさえあれば良い。そこで、6.3.1節の負荷力率の結果から、力率割引を最大限受けられるための最小コンデンサ容量の試算を行い、適正なコンデンサ容量とその選定手法について検討を行う。

#### (1) 試算方法

電気料金の力率割引を最大とするには、厳密には受電点力率が平均で遅れ0.995より進み側にあれば、力率割引は1.00とされる。そこで、6.3.1節で測定した自動力率調整装置の無い高圧需要家8軒について、負荷の有効電力Pと推定した無効電力Q'から、受電点力率が遅れ0.995に改善できる最小のコンデンサ容量を試算する。

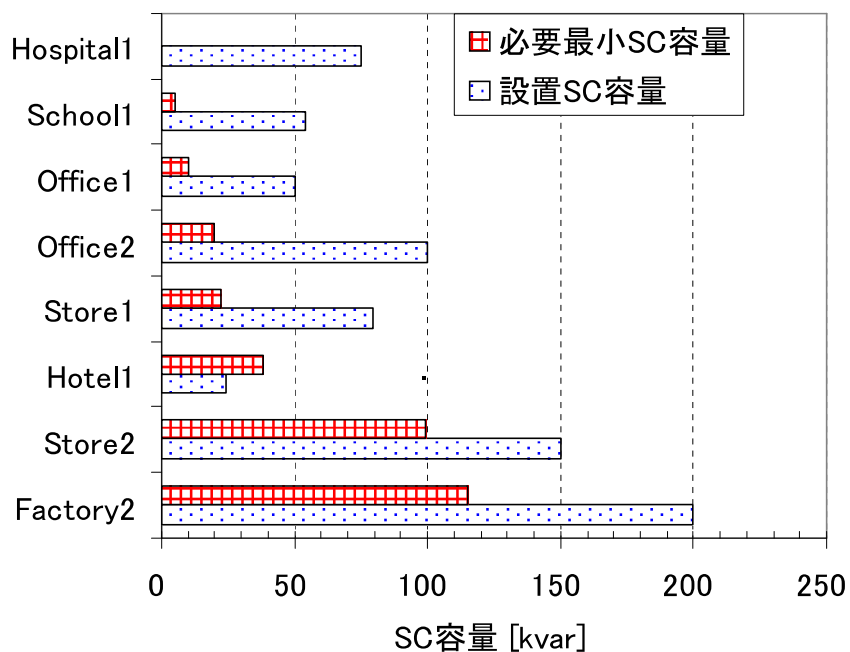


図 6-9 現在の設置 SC 容量と試算した必要最小 SC 容量

Fig.6-9 Actual capacity and required capacity of SC

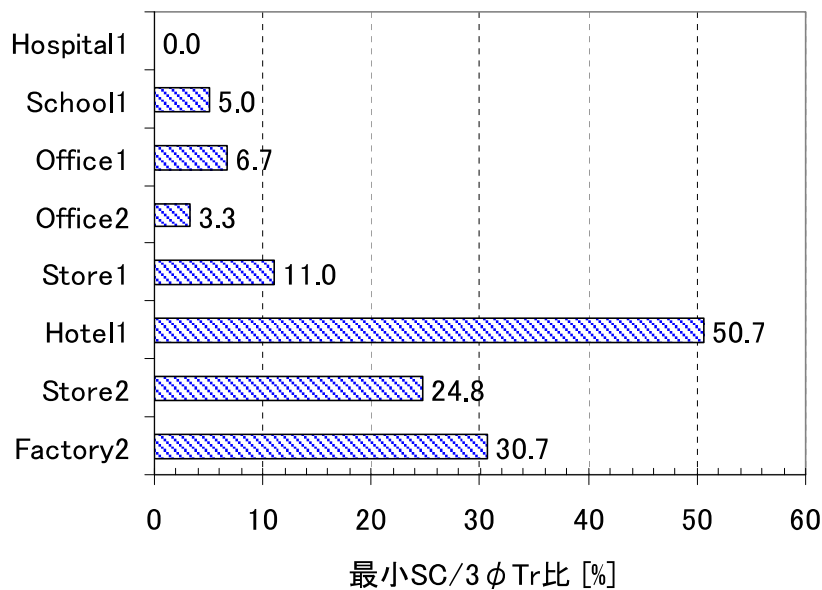


図 6-10 三相変圧器容量に対する必要最小 SC 容量比

Fig.6-10 Ratio of required capacity versus three-phase transformer

(2) 削減可能なコンデンサ容量

図 6-9 に需要家に現在設置されているコンデンサ容量(設置 SC 容量)と今回試算した必要最小コンデンサ容量(必要最小 SC 容量)を示す。図の設置 SC 容量から必要最小 SC 容量を差し引いた値が、当該需要家における削減可能なコンデンサ容量となる。

その結果、今回算出した自動力率調整装置が無い高圧需要家 8 軒中 7 軒で、現在設置されているコンデンサ容量は大き過ぎることが明らかとなった。この内、5 軒の需要家については、必要最小 SC 容量の 3 倍以上のコンデンサが設置されている状態であった。

(3) 三相変圧器容量に対する割合

図 6-10 に算出した必要最小 SC 容量を三相変圧器容量に対する割合(以下、最小 SC/3φ Tr 比という)で示す。最小 SC/3φ Tr 比は、8 軒中 7 軒は約 30%以下であり、この内 5 軒については 11%(9 分の 1)以下となった。即ち、これら需要家においては三相変圧器容量の 9 分の 1 のコンデンサ容量を選定しても、測定期間と同様な負荷状態であれば、受電点力率は遅れになることはなく、力率割引を最大限受けられる。一方、残りの 3 軒は、比較的負荷力率が悪く、最小 SC/3φ Tr 比は 25~50%であった。

#### (4) 適正なコンデンサ容量の選定

今回の算出結果から、高圧需要家に設置されているコンデンサ容量は、元来言われている三相変圧器容量の3分の1では大き過ぎる状態にあり、需要家によっては9分の1でも力率割引が十分受けられることが明らかとなった。しかしながら、9分の1という選定手法を全ての需要家に当てはめることは、負荷力率や使用状態が異なるため一概には難しい。したがって、需要家にとって適正なコンデンサ容量は、三相変圧器容量から一律に選定するのではなく、業種(負荷力率)と使用状態、自動力率調整装置の導入も含めたコンデンサ設備として検討していくことが必要である。

### 6.4 力率改善による電圧上昇の抑制<sup>(11)</sup>

現在、ほとんどの需要家で進相コンデンサは配電線に接続したままの状態になっている<sup>(7)</sup>。そこで需要家に自動力率調整装置が導入された場合の電圧上昇と電圧変動の抑制効果を簡単な系統モデルを使って評価する。

#### (1) 系統モデルと試算条件

図6-11に試算に用いた簡易系統モデル、表6-1に試算条件をそれぞれ示す。各需要家は配電線に均等配置とし、負荷容量は昼夜の変動を想定し100, 300, 500kW、負荷力率を遅れ0.9とした。コンデンサ設備は200kvar固定の場合と自動力率調整装置導入の場合とした。配電線のこう長Lは4km、線路インピーダンスZは $0.313+j0.355\Omega/\text{km}$ <sup>(12)</sup>とした。

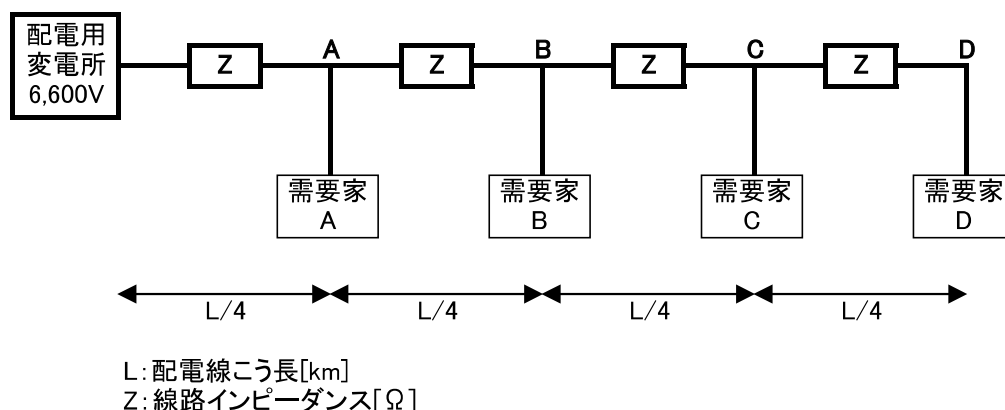


図 6-11 簡易系統モデル

Fig.6-11 Simple distribution model

表 6-1 試算条件

Table 6-1 Trial calculation conditions

記号：遅れは「-」、進みは「+」

条 件		ケース 1	ケース 2	ケース 3
需要家	負荷容量	500kW	100~500kW	100~500kW
	受電点力率	-0.9~+0.9	+0.55~-0.99	1.0
進相コンデンサ		- - -	200kvar	48~240kvar
ケースの説明		2,000kW/フィーダーの配電線路を想定。	軽負荷時に進み力率となる現在の配電線を想定。	自動力率調整装置が設置された配電線で、力率は常に 1.0 を想定。

## (2) 試算結果と考察

図 6-12 に各ケースにおける電圧変動の試算結果を示す。同図(a)のケース 1 は、2,000kW の配電線を想定したケースで、配電線の力率が遅れ 0.9 の地点 D では、約 350V の電圧降下となる。また、進み 0.9 では約 100V の電圧降下となった。

ケース 2 の同図(b)は、夜間・休日など軽負荷時に進み力率となる現在の配電線を想定し、需要家の負荷力率を遅れ 0.9、コンデンサ容量 200kvar 一定、負荷容量を 100, 300, 500kW と変化させたグラフである。グラフから負荷容量が 500kW から 100kW まで減少(日中→夜間の使用電力を想定)すると、配電線の力率は遅れ 0.99 から進み 0.55 となり、末端の電圧は 260V の電圧降下から 35V の電圧上昇へと約 300V の変動幅となった。

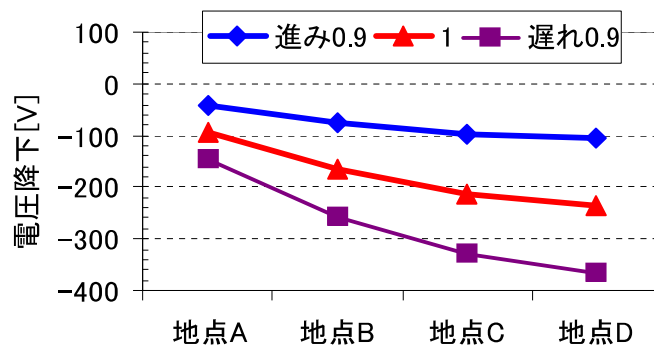
ケース 3 の同図(c)は、需要家のコンデンサを自動力率調整装置により調整し、配電線力率を常に 1.0 としたグラフである。負荷容量が 500, 300, 100kW と減少しても自動力率調整装置により 240, 145, 48kvar のコンデンサがそれぞれ投入され、受電点力率は 1.0 となる。そのため、フェランチ効果は発生せず末端の電圧上昇は無くなり、軽負荷時との電圧変動幅は約 190V となった。

## (3) 自動力率調整装置導入による電圧変動の抑制

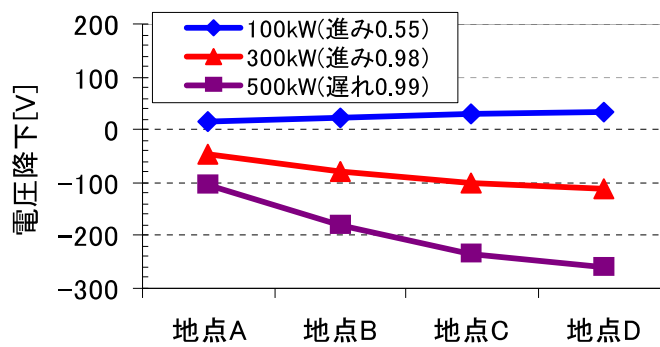
ここでは簡易な系統モデルにより、需要家の力率を変化させた場合の配電系統における電圧変動の試算を行った。その結果、需要家の負荷容量が減少し、配電線路が過度の進み力率状態となると、末端の電圧は送電端より上昇することが明確となった。とくに現在の

配電線(日中は重負荷, 夜間は軽負荷)を想定したケース 2 では, 末端の電圧が 35V ではあるが上昇しており, 負荷機器には過電圧の印加となり機器の寿命低下など影響が懸念される。さらに末端の電圧変動は日中と夜間では約 300V(低圧側では約 5V)が予想され, 負荷機器の運転に支障をきたす恐れがある。この場合, 配電変電所の変圧器でタップ切換えによる電圧補償も行われるが, フィーダー毎に力率が異なることも考えられ一律の調整は難しい。また, 過度の進み力率状態では, 電流の絶対値は力率 1 の場合よりも大きくなるため, 線路抵抗による電力損失も増加する。

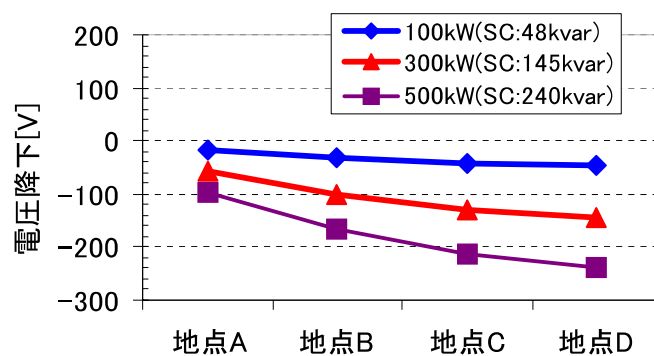
そのため, ケース 3 のように自動力率調整装置を導入する, あるいは適正な容量のコンデンサを設置することで, 電圧上昇や電圧変動幅の抑制をすることが可能である。



(a) 2,000kW の配電線



(b) 軽負荷時に進みとなる配電線(需要家 SC:200kvar 一定)



(c) 自動力率調整装置を導入した配電線(各点の力率:1.0)

図6-12 高压配電線の電圧降下

Fig.6-12 Voltage drop of high-voltage distribution line

## 6.5 結言

本章では、高圧需要家のコンデンサ設備および負荷力率の実態調査を行い、適正なコンデンサ容量の提案と自動力率調整装置が導入され場合の配電系統の電圧上昇の影響について評価を行った。実態調査は、中部電力管内にある高圧需要家 6,000 軒の進相コンデンサ容量と自動力率調整装置導入の調査を行い、変圧器容量別のコンデンサ容量と自動調整している高圧および低圧のコンデンサ容量の実態を明らかにした。また、高圧需要家 25 軒の受電点における力率測定を行い、需要家設備の負荷力率の推定と適正なコンデンサ容量について検討を行った。さらに、高圧需要家に自動力率調整装置が導入された場合の配電系統の電圧上昇と電圧変動の抑制について、簡単なシミュレーションモデルを用いて検証した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 高圧の進相コンデンサ容量は、概ね三相変圧器容量の 3 分の 1 程度が取り付けられているが、100kVA 以下の小規模な設備においては、三相変圧器の約 40%のコンデンサが取り付けられていた。
- (2) 自動力率調整装置の設置率は約 5%で、コンデンサのほとんどが高圧配電線に接続されたままの状態にあった。とくに 1,000kVA を超える設備においては、3 軒に 1 軒が自動力率調整装置により、調整している状態にあった。
- (3) 自動力率調整装置を設置している需要家の約 70%は、低圧コンデンサにより自動調整を行っている。とくに低圧コンデンサで自動調整している設備では、低圧調整コンデンサだけで三相変圧器容量の 3 分の 1 程度あり、さらにそこへ高圧の固定コンデンサを取り付けている状態であった。
- (4) 高圧需要家 25 軒の負荷力率は、製造業以外の業種では平均遅れ 0.95 と良い状態にあった。また、需要家 8 軒について必要なコンデンサ容量を分析した結果、7 軒で三相変圧器容量の 3 分の 1 では大き過ぎ、さらに 5 軒については、9 分の 1 のコンデンサでもよいことが明らかとなった。
- (5) 配電線路が過度の進み力率状態であると、末端の電圧は送電端より上昇し、昼夜の電圧変動幅も大きい。需要家に自動力率調整装置を導入することで、電圧上昇は無くなり、電圧変動も小さくなる。

以上の通り、コンデンサ容量を変圧器容量の 3 分の 1 から選定するのは実態に合わない状況にあり、業種別の負荷力率と自動力率調整装置の導入を考慮したコンデンサ設備として検討していく必要がある。

## 第 6 章 参考文献

- (1) 日本電設工業会：“新編・新人教育電気設備増補版”，オーム社，pp.178（1987）
- (2) 岩崎電気：“ライティング講座”，岩崎電気㈱HP，<http://www.iwasaki.co.jp>
- (3) 日本リライアンス：“情報誌バックアップ”，日本リライアンス㈱HP，Vol.004，<http://www.reliance-electric.co.jp>
- (4) 電気設備学会中部支部：“エネルギー設備の使用実態を踏まえた分散型電源導入時の影響評価に関する調査研究報告書”，(社)電気設備学会中部支部，pp.60（2004）
- (5) 山田琢寛：“高圧受電設備における力率の実態と進相コンデンサ容量”，(社)電気設備学会誌，Vol.25，No.10，pp.788 - 791（2005）
- (6) 原 英喜，小林浩，内藤寛，山田琢寛，柴山直幹，中村光一：“高圧受電設備に取り付けられる進相コンデンサ容量の実態調査”，平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集，pp.19-20（2004）
- (7) 原 英喜，小林浩，山田琢寛，太田宗則，内藤寛，青木睦，中村光一：“高圧受電設備における自動力率調整装置の実態調査”，平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集，pp.11-12（2005）
- (8) 小林浩，内藤寛，山田琢寛，原 英喜，柴山直幹，中村光一：“高圧受電設備における力率の計測と分析”，平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集，pp.21-22（2004）
- (9) 内藤寛，青木睦，中村光一，山田琢寛，太田宗則，小林浩，原 英喜：“高圧受電設備における力率の測定と進相コンデンサ容量の検討”，平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集，pp.13-14（2005）
- (10) Hiroshi Naito, Mutumi Aoki, Hideki Hara, Hiroshi Kobayashi, and Takukan Yamada：“Analysis of Power Factor and Voltage at Receiving Points based on Actual Measurements”，Proceedings of International Workshop on Electrical Installations，pp.403-406（2005）
- (11) 山田琢寛，柴山直幹，原 英喜，小林浩，内藤寛，中村光一：“高圧受電設備の進相コンデンサが配電系統電圧に与える影響”，平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集，pp.25-26（2004）
- (12) 日本電気協会：“分散型電源 系統連系技術指針 JEAG9701-2001”，(社)日本電気協会（2002）



## 第 7 章

### 結論

#### 7.1 本論文で得られた成果

本論文では、一般家庭や工場、オフィスビルなど需要家設備に直接影響を与える異常電圧の中で予防保全可能な電圧上昇に着目し、低圧開閉器接点の接触不良検出と異常電圧の抑制方法、配電系統の過剰な進相コンデンサの実態とその対策について提案した。

需要家設備の低圧開閉器接点の接触不良には、辛うじて導通状態にあるものや開閉器操作直後に不導通に至るものまでである。そこで本論文の第 2 章～第 5 章において、このような状態にある接触不良を超音波とダイオード転流回路を用いて検出する手法の提案と負荷機器に印加される過電圧の防止法、さらにはこの接触不良を低圧電路の電源端から検出する手法について報告した。

そして第 6 章において、高圧需要家の過剰な進相コンデンサが配電系統の電圧上昇へ与える影響について調査研究を行った。即ち、需要家設備のコンデンサ容量と自動力率調整装置導入の実態調査および力率の実測を行い、需要家にとっての適正なコンデンサ容量について述べた。さらに配電系統の進み力率が改善された場合の電圧上昇と電圧変動の抑制について、簡単なシミュレーションモデルにより影響評価を行った。

以上、これらの研究成果をまとめると以下の通りである。

第 2 章では、低圧開閉器接点の接触不良の種類と負荷設備へ与える影響、そして開閉器の接触抵抗と負荷電流の実態調査結果について述べた。とくに低圧開閉器の接触抵抗については、一般家庭 54 軒に実際に訪問し、単相 3 線式開閉器の接触抵抗を測定し、その実態を明らかにした。また、接触不良の原因の一つである発錆について、単相 3 線式回路の負荷電流を測定し発錆環境の一つである発熱量について検討した。さらに、開閉器の入り切り操作回数を変えた場合の接触抵抗への影響についても報告した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 低圧開閉器接点の接触不良には、辛うじて導通している状態や不導通のような抵抗値の高い状態まである。とくに辛うじて導通している接触不良接点は、テスターなどでは発見できなため、新しい検出方法が求められている。
- (2) 一般家庭における低圧開閉器の接触抵抗の実態は約  $0.5\sim 10\text{m}\Omega$  の範囲内にあり、開閉操作により  $100\text{m}\Omega$  以上の接触不良に至る開閉器が数台あった。また、入り切り操作回数を増やすことで、接触不良の多くは回避できると言える。
- (3) 一般家庭の負荷電流の実態は、日中ではその  $80\%$  が  $5\text{A}$  未満であり、負荷設備のバランスは  $L_1\text{-N}$  相または  $N\text{-L}_2$  相に偏っている家庭が多かった。一方、集合住宅の主幹開閉器では、負荷電流は  $L_1\text{-N}$  相、 $N\text{-L}_2$  相にバランスよく流れており、開閉器の中性点に生じるジュール熱量は両電圧線の約  $20$  分の  $1$  以下と少なく、発錆しやすい環境にあることが明らかとなった。

低圧開閉器接点の接触不良は、本章で述べたようにテスターでは発見できない辛うじて導通している状態や、投入時に不導通となって異常電圧を発生させるものがあり、それぞれ状態にあった点検手法と防止対策が求められる。また、負荷電流の測定結果において、一般家庭の大半は  $5\text{A}$  未満であることから、一般家庭開閉器の接触不良診断には  $5\text{A}$  までの負荷電流を想定して検討していくこととする。

第3章では、超音波を使った低圧開閉器接点の接触不良検出法の提案とモデル開閉器接点および市販開閉器による検出の有効性について実験的検証を行った。

モデル開閉器接点を用いた実験は、 $30\text{A}$  クラスの銅板と接点を組み合わせたモデル開閉器接点を作製し、乾燥野草や粉末アルミナなどで各種接触不良状態を模擬し、通電電流  $5\text{A}$  と  $30\text{A}$  領域までの超音波法の有効性を検証した。検証では接点間に現れる電圧波形に注目し、電圧実効値とその波形パターンから接点の接触不良状態について検討した。さらに超音波出力レベルを可変し、電圧の増大との関係についても検討を行った。

市販開閉器による実験では、実際に市販されている  $30\sim 200\text{A}$  クラスの接点圧力の異なる開閉器を用いて、超音波法の検出有効性を検証するとともに超音波印加時の接点間電圧値の様相、超音波出力と開閉器容量の関係について検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 接触抵抗の低い辛うじて導通している接触不良接点に超音波を印加すると、接触抵抗は増大するため接触不良の検出は可能である。

- (2) 乾燥野草，サクラの木など柔らかい試料の接触不良接点においても，超音波の印加により電圧は増大するため，接触不良の検出は可能である。とくに一般家庭の開閉器では，日中の負荷電流は 5A 以下が多いことから，検出には十分有用である。一方で，負荷電流が 30A までの領域については，試料の種類や接触状態によっては，良好な接点と判別出来ない場合もある。
- (3) アルミナのような硬い試料の接触不良接点では，超音波を印加しても電圧実効値の増大は少ないため検出は難しい。
- (4) 200A クラスまでの市販開閉器においても，超音波の印加により接触抵抗は増大するため，接触不良検出の可能性は十分ある。

本章で行った検出は，辛うじて導通している接触不良接点を超音波の印加により接触抵抗を増大させ検出する手法である。しかし，実際の接触不良は開閉器操作直後に起きることもあり，その場合，この超音波による検出では対応できない。そのため，開閉器操作直後に発生する接触不良については，新たに別の手法で検出する必要がある。さらに接触不良に伴い発生する異常電圧について，負荷機器に印加されないよう確実に防止することも必要である。

第 4 章では，ダイオード転流回路による低圧開閉器接点の接触不良検出法の提案と 100/200V の実負荷による実用性の検証を実験的に行った。実験は単相 3 線式回路に 3kW 程度の負荷を接続し，0~30A 領域までの実用性を検証し，検出レベルを明らかにした。また，漏電遮断器の漏電検出機能を用いた接触不良検出についても実験的に検証を行った。さらに，開閉器接点の接触不良に伴って生じる異常電圧をダイオード転流回路により防止する手法についても検証を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) ダイオード転流回路による低圧開閉器の接触不良検出は，ダイオード両端に現れる波形が，正弦波であれば良好，方形波状であれば接触不良と診断する手法で，検出までの間は，負荷機器に異常電圧を与えることはない。
- (2) ダイオード転流回路による接触不良検出は，通電電流 1A 以上であれば 1Ω 以上の接触抵抗を確実に検出できる。また，1A 以下であってもダイオード両端の電圧は 1V 以下であるため，負荷機器に異常電圧を与えない。
- (3) 開閉器が漏電遮断器の場合，遮断器投入直後の開放動作により，1Ω 以上の接触抵抗を検出できる。

- (4) 開閉器接点の接触不良により負荷機器へ印加される異常電圧は、ダイオード転流回路の使用により確実に防止できる。
- (5) 超音波とダイオード転流回路を組み合わせることで、開閉器操作前と操作直後の接触不良を安全にかつ確実に検出することができる。

本手法の最大の特徴は開閉器操作直後の接触不良を検出し、開閉器の投入から開放までの間も負荷側に掛かる電圧を  $101 \pm 6V$  など規定電圧以内に保つものである。実際の検出レベルはダイオードの飽和電圧  $V_s$  の値によって決まるが、今回使用した  $1V$  前後のダイオードを使用すれば、 $1\Omega$  以上の接触抵抗の検出は可能であり、異常電圧の印加も確実に防止できる。

第 5 章では、開閉器の接点や端子などの緩みによる接触不良個所を低圧電路の電源端から検出する手法について述べた。実験は開閉器の端子を緩め接触不良を模擬させた状態で、電源端から高調波を重畳させ、電圧・電流波形の周波数解析を行った。その結果、端子が接触不良状態ではその電圧波形は大きく歪み、高調波成分が現れることを実験的に明らかにした。そして、電源端に高調波を重畳させることで、正常な状態か接触不良状態なのかを判別できる可能性について報告した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 開閉器端子などが接触不良状態になると、その端子間の電圧波形は歪み波形となり、第 2 次、第 3 次の高調波成分が顕著に現れることを明らかにした。
- (2) 電源端から第 2 次高調波を徐々に重畳していくと、接触不良個所がある場合、電源端から見た第 2 次高調波インピーダンスの絶対値は数  $\Omega$  の変動傾向にあり、接触不良を検出できる可能性がある。

本手法は実験結果を基に検討したため、必ずしも確定的ではないが、さらにデータを集めて定性的に提言できるよう検討する必要がある。

第 6 章では、高圧需要家のコンデンサ設備および負荷力率の実態調査を行い、適正なコンデンサ容量の提案と自動力率調整装置が導入され場合の配電系統の電圧上昇の影響について評価を行った。実態調査は、中部電力管内にある高圧需要家 6,000 軒の進相コンデンサ容量と自動力率調整装置導入の調査を行い、変圧器容量別のコンデンサ容量と自動調整している高圧および低圧のコンデンサ容量の実態を明らかにした。また、高圧需要家 25 軒

の受電点における力率測定を行い、需要家設備の負荷力率の推定と適正なコンデンサ容量について検討を行った。さらに、高圧需要家に自動力率調整装置が導入された場合の配電システムの電圧上昇と電圧変動の抑制について、簡単なシミュレーションモデルを用いて検証した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 高圧の進相コンデンサ容量は、概ね三相変圧器容量の 3 分の 1 程度が取り付けられているが、100kVA 以下の小規模な設備においては、三相変圧器の約 40%のコンデンサが取り付けられていた。
- (2) 自動力率調整装置の設置率は約 5%で、コンデンサのほとんどが高圧配電線に接続されたままの状態にあった。とくに 1,000kVA を超える設備においては、3 軒に 1 軒が自動力率調整装置により、調整している状態にあった。
- (3) 自動力率調整装置を設置している需要家の約 70%は、低圧コンデンサにより自動調整を行っている。とくに低圧コンデンサで自動調整している設備では、低圧調整コンデンサだけで三相変圧器容量の 3 分の 1 程度あり、さらにそこへ高圧の固定コンデンサを取り付けている状態であった。
- (4) 高圧需要家 25 軒の負荷力率は、製造業以外の業種では平均遅れ 0.95 と良い状態にあった。また、需要家 8 軒について必要なコンデンサ容量を分析した結果、7 軒で三相変圧器容量の 3 分の 1 では大き過ぎ、さらに 5 軒については、9 分の 1 のコンデンサでもよいことが明らかとなった。
- (5) 配電線路が過度の進み力率状態であると、末端の電圧は送電端より上昇し、昼夜の電圧変動幅も大きい。需要家に自動力率調整装置を導入することで、電圧上昇は無くなり、電圧変動も小さくなる。

## 7.2 今後の課題と将来展望

第 2 章では一般家庭 54 軒の接触抵抗測定を実施したが、今後は工場やビルなどの高圧需要家での開閉器の接触抵抗測定を行い、接触抵抗の実態と接触不良原因の分析が必要である。さらに、開閉器の使用年数と接触抵抗の傾向を分析し、最適な交換時期などの指標を明示することも必要である。また、開閉器端子間に生じるジュール熱と発錆については、負荷電流のアンバランス状態など発錆条件を明らかにする必要がある。

第 3 章で行った超音波による接触不良検出の有効性の検証では、超音波の印加により接触抵抗が増大するメカニズムが明らかになっていない。診断装置を設計する上で超音波出

力などは重要な項目であるため、メカニズムの解明が必要である。

第4章のダイオード転流回路を用いた手法では、30A以上の電流領域について検討を行っていないため、それら領域における使用可能なダイオード、検出レベルおよび安全性などを検討し、実際に検出可能な電流領域を明らかにする必要がある

この超音波とダイオード転流回路を用いた手法にはそれぞれメリット、デメリットがあるが、各々のデメリットについてはもう一方の手法により補うことが可能である。したがって両手法を組み合わせることで、開閉器操作前と操作直後の接触不良を安全、かつ確実に検出することができる。とくに一般家庭の開閉器に限定すれば、その有用性は十分ある。しかし、近年の点検形態は開閉器操作を行う機会が少なくなっており、装置の実用化に当たっては設備点検の実態を再確認し、一般家庭の漏電・配線点検作業を妨げない簡便なものにしていく必要がある。一方で、工場やオフィスビルなどにある小容量の開閉器にも本手法は適用可能と考えるが、開閉器の使用形態は様様であり点検時間も限られているため、作業性を妨げない装置としていく必要がある。このように超音波とダイオード転流回路を使った接触不良診断装置は、作業性を妨げない短時間で診断できる簡便なものとしなければならない。そして、開発費用とその効果を十分検討することで実用化は可能と考えている。

第5章の高調波重畳による電源端からの接触不良検出では、さらに実験データを増やし本手法の有効性を明らかにするとともに、重畳する高調波の量と位相についても検討していく必要がある。それらの結果を基に、接触抵抗と発生高調波などを考慮した接触不良モデルを作成し、高調波発生源の負荷機器や電源、そして位相を含めた実際の電路に近い形でシミュレーションを行い、本手法の有効性と検出レベルを検証しなければならない。

第6章で提案した適正な進相コンデンサ容量について、さらに多くの需要家で力率測定を行い、より細かい業種別の負荷力率を決定し、需要家の業種と実際の負荷容量からコンデンサ容量を容易に選定できるメニュー的な提案が必要と考える。また、今回使用した電圧上昇のシミュレーションモデルは、4分岐の簡単な回路であったが、今後は実配電線路に近いモデルで検証する必要がある。

配電設備における異常電圧は、需要家にとって非常に身近な問題であり、その影響も大きい。そのため、低圧開閉器接点の接触不良による異常電圧の発生と配電系統の過剰な進相コンデンサによる電圧上昇については、本研究で述べたように配電設備の保守・管理方法の適正化により確実に予防保全していかなければならない。

低圧開閉器接点の接触不良については、近年の点検形態を再確認し本研究で確立した手

法を実用化しなければならない。一方で、この接触不良検出技術を開閉器本体に組み込ませ、異常時に管理者へ通知させる自己診断機能を持った開閉器の開発も期待したい。これにより開閉器の点検頻度は少なくなるため、接触不良によるトラブルの発生や作業者への心理的負担も解消されると考える。さらに将来的には、漏電監視と同様にオンラインによる常時監視技術が確立され、接触不良の早期検出と予防保全が図られていくものと期待する。

配電システムの過剰な進相コンデンサについては、コンデンサ容量の選定のルール化、自動力率調整装置の導入により、ある程度の進み力率状態は改善されると考える。しかしながら、現在の電力会社の力率割引制度は遅れ側のみにあり、進み力率側でのペナルティー制度などが無いため、全ての需要家設備に自動力率調整装置が導入されるとは考え難い。よって、配電システムの進み力率を抑制するには、需要家に設置されるコンデンサ設備が、需要家、設計・施工者、コンデンサメーカー、電力会社、国(環境)が共にメリットを有するコンデンサ容量あるいは制度にする必要がある。これにより、配電線路の電圧上昇および電圧変動は抑制されることから、より安定で信頼度の高い電圧供給が可能となる。さらに、力率改善されることは線路抵抗による電力損失も最小になるため、二酸化炭素削減にも繋がり地球温暖化にも貢献できる。

以上の通り、設備の保守・管理方法を適正に行うことは、配電線や需要家設備で問題となっている電圧上昇の抑制に繋がることとなり、安定した電力供給が期待できる。

## 謝辞

本研究の遂行，論文作成にあたり，終始熱心にご指導ご鞭撻を賜りました名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻教授 鶴飼裕之先生に衷心より謝意を表し，御礼申し上げます。

本研究の遂行，論文作成にあたり，貴重なご意見，ご助言を頂戴致しました名古屋工業大学大学院工学研究科教授 平井洋武先生，同教授 水野幸男先生，同教授 竹下隆晴先生に深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり，貴重なご意見を頂きました名古屋工業大学おもひ領域所属内地研究員 中村光一先生(有限会社カエラ研究所代表取締役)，大同工業大学助教授 愛知久史先生，名古屋工業大学大学院工学研究科助手 青木睦先生，同助手 太田豊先生に深く感謝いたします。

モデル開閉器接点の作製および貴重な技術資料の提供をして頂きました，日東工業株式会社 黒野透氏には，深く感謝いたします。

本研究の打ち合わせに幾度となくご足労頂き，貴重なご意見を頂きました株式会社トーエネック 小林浩氏，中部電力株式会社 山田琢寛氏，同社 坂井洋志氏，博士前期課程 内藤寛氏，学部4年生 山田昌平氏に深く感謝致します。

また，本研究の遂行にあたり，終始熱心なご討論，ご協力を頂きました博士前期課程 松井彰氏(現在，東邦ガス株式会社勤務)，学部4年生 中井亮太氏には，深く感謝いたします。

本研究は名古屋工業大学鶴飼研究室で行われたものであり，的確かつご丁寧なご助言を頂きました研究員 橋口卓平氏，博士後期課程 中地芳紀氏，そして，日夜苦勞を共にした鶴飼研究室の皆様，日頃の生活においてお世話になりました秘書の八幡まゆみ氏に感謝いたします。

そして大学院博士後期課程進学にご配慮くださいました，財団法人中部電気保安協会 伊藤嘉昭技術グループ長はじめ，関係諸氏に厚く御礼申し上げます。

最後に，大学生活および研究活動に専念している間，いつも暖かい家庭を築いてくれた妻 由里に感謝します。

2006年2月  
工学研究科 博士後期課程 情報工学専攻  
原 英喜



## 研究業績

### 学会誌掲載論文

- (1) 原 英喜, 中村光一：“超音波とダイオード転流回路を用いた低圧開閉器の接触不良検出法の提案”, 電気学会論文誌 B(研究開発レター), 121 巻 3 号, pp.413-414 (2001).
- (2) 原 英喜, 中村光一：“一般家庭における低圧遮断器接点の接触抵抗とジュール熱”, 電気設備学会誌(研究速報), Vol.21, No.12, pp.1031-1032 (2001).
- (3) 原 英喜, 中村光一：“超音波法による低圧開閉器接触不良検出時の接点間電圧の検討”, 電気学会論文誌 B, 122 巻 9 号, pp.1010-1015 (2002).
- (4) 原 英喜, 鶴飼裕之, 中村光一：“ダイオード転流回路を用いた低圧開閉器接触不良検出と異常電圧印加防止”, 電気設備学会誌, Vol.24, No.3, pp.230-235 (2004).

### 国際学会発表論文

- (1) Hideki Hara, Hiroyuki Ukai, and Koichi Nakamura : “Poor Contact Detection Method of Low Voltage Switch Using Ultrasonic Wave and Diode Commutation Circuit”, Proceedings of International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Vol.2, pp.254-259 (2004).
- (2) Hiroshi Naito, Mutumi Aoki, Hideki Hara, Hiroshi Kobayashi, and Takukan Yamada : “Analysis of Power Factor and Voltage at Receiving Points based on Actual Measurements”, Proceedings of International Workshop on Electrical Installations, pp.403-406 (2005).

### 国内学会発表論文

- (1) 原 英喜, 中村光一：“超音波を用いた低圧開閉器の接触不良検出法の提案”, 平成 12 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿集, pp.79, 静岡大学 (2000).
- (2) 原 英喜, 中村光一：“超音波とダイオード転流回路を用いた低圧開閉器の接触不良検出”, 平成 13 年電気学会全国大会予稿集, 名古屋大学 (2001).
- (3) 原 英喜, 中村光一：“一般家庭における低圧開閉器の接触抵抗に関する調査”, 平

- 成 13 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.85-86, 九州大学 (2001).
- (4) 松井彰, 原 英喜, 鶴飼裕之, 中村光一: “超音波法による市販開閉器接触不良検出の有効性”, 平成 15 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.329-330, 名古屋工業大学 (2003).
- (5) 原 英喜, 鶴飼裕之, 中村光一: “ダイオード転流回路を用いた低圧開閉器接触不良検出と異常電圧印加防止”, 平成 15 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.373-374, 名古屋工業大学 (2003).
- (6) 原 英喜, 小林浩, 内藤寛, 山田琢寛, 柴山直幹, 中村光一: “高圧受電設備に取り付けられる進相コンデンサ容量の実態調査”, 平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.19-20, 関西学院大学 (2004).
- (7) 小林浩, 内藤寛, 山田琢寛, 原 英喜, 柴山直幹, 中村光一: “高圧受電設備における力率の計測と分析”, 平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.21-22, 関西学院大学 (2004).
- (8) 内藤寛, 山田琢寛, 原 英喜, 小林浩, 柴山直幹, 中村光一: “高圧受電設備における最適な進相コンデンサ容量の検討”, 平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.23-24, 関西学院大学 (2004).
- (9) 山田琢寛, 柴山直幹, 原 英喜, 小林浩, 内藤寛, 中村光一: “高圧受電設備の進相コンデンサが配電系統電圧に与える影響”, 平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.25-26, 関西学院大学 (2004).
- (10) 内藤寛, 青木睦, 中村光一, 原 英喜, 小林浩, 山田琢寛: “実測に基づく高圧需要家の受電端電圧頻度分布の分析”, 平成 17 年度電気学会電力・エネルギー部門大会予稿 CD-ROM, No.220, 大阪大学 (2005).
- (11) 原 英喜, 小林浩, 山田琢寛, 太田宗則, 内藤寛, 青木睦, 中村光一: “高圧受電設備における自動力率調整装置の実態調査”, 平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.11-12, 東北学院大学 (2005).
- (12) 内藤寛, 青木睦, 中村光一, 山田琢寛, 太田宗則, 小林浩, 原 英喜: “高圧受電設備における力率の測定と進相コンデンサ容量の検討”, 平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.13-14, 東北学院大学 (2005).
- (13) 小林浩, 原 英喜, 山田琢寛, 太田宗則, 内藤寛, 青木睦, 中村光一: “実測結果を踏まえた高圧受電設備及び配電系統の簡易モデルの検討”, 平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.15-16, 東北学院大学 (2005).
- (14) 山田琢寛, 太田宗則, 小林浩, 原 英喜, 内藤寛, 青木睦, 中村光一: “高圧受電

設備の進相コンデンサが配電系統に与える影響評価”，平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集，pp.17-18，東北学院大学 (2005).

(15) 小林浩，原 英喜，山田琢寛，太田宗則，内藤寛，青木睦，中村光一：“高圧受電設備における削減可能な進相コンデンサ容量の検討”，平成 17 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿 CD-ROM，No.O-182，名城大学 (2005).

(16) 内藤寛，青木睦，中村光一，山田琢寛，太田宗則，原 英喜，小林浩：“配電系統における力率が電圧不平衡に与える影響の基礎検討”，平成 17 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿 CD-ROM，No.O-184，名城大学 (2005).

## 特許取得

(1) 発明の名称：“接触不良検査方法及び接触不良検査装置”

特許番号：第 3451591 号

発明者：中村光一，原 英喜

特許権者：中村光一，財団法人中部電気保安協会

特許取得日：平成 15 年 7 月 18 日