

活線シース絶縁不良点測定装置の開発

富澤 拓也*(フジクラ・ダイヤケーブル), 常陰 照嗣(フジクラ・ダイヤケーブル),
浅木 竜也(フジクラ・ダイヤケーブル), 非会員 太田 健***(トヨタ自動車)

Development of live-line locator for insulation failure of cable sheath

Takuya Tomizawa* (Fujikura Dia Cable), Terutsugu Tsunekage (Fujikura Dia Cable),

Ryuya Asagi (Fujikura Dia Cable), Ken Ohta** (Toyota Motor Corporation)

A manufacturing technology of high-voltage cable has been improved in recent years, and internal degradation is on the decrease. But external degradation such as damage of sheath remains. Therefore, it is more important to perform proper maintenance of cable sheath. Murray Loop Bridge is excellent as a locator for insulation failure point in location accuracy. But, it is used under off line. On the other hand, stopping power supply to a high voltage cable is difficult in a factory which keeps the high rate of operation.

Therefore, we developed the prototype of live-line locator for insulation failure of cable sheath at first. we evaluated it at the actual line and obtained a good locating characteristic. So, we also developed a manufactured product and report it this time.

キーワード：活線，マレーループブリッジ，絶縁不良点測定

Keywords : Live line, Murray loop bridge, Locating insulation failure

1. まえがき

高圧 CV ケーブルの地絡による突発的な停電事故は需要先に多大な影響を及ぼす。高圧 CV ケーブルは製造技術の向上に伴い、内因的な劣化は少なくなっているが、防食層であるシースが不良となった場合、外因的な事由により停電事故につながるケースは少なくない。また、ケーブル主絶縁の代表的な劣化形態である水トリーは絶縁欠陥部の存在と水の侵入により生じるため、日頃からシースを適正に保守することは極めて重要である。

近年、シースの絶縁抵抗を活線で計測できる診断装置はあるが、絶縁不良個所を特定する測定器はケーブルの停電事故を想定しており、停止線路にしか適用できない。シース絶縁不良は主絶縁不良と異なり、不良個所を特定すれば、部分補修を行なってケーブル寿命を延ばすことが可能である。しかし、高稼働な工場などでは停止時間の確保も難しく、シースの絶縁抵抗の状態は湿度など環境条件により変化するため、限られた時間内でシース絶縁抵抗不良点の特定まで至らないケースがある。このような時、常時の活線中にシース絶縁抵抗不良を診断するだけでなく、場所まで特定しておくことは、保守作業について以下のような効果

が得られる。

- ① 「ケーブル不良処置の短納期化」により電力安定供給に寄与する。
- ② 経路間の往復を最小限にし、災害リスクを最小限にする。
- ③ 停電出勤のやり直し工数低減。
- ④ 作業者の精神的負担軽減。

今回、被測定ケーブルのシース絶縁不良個所を活線状態で特定できる装置について検討を行い、実線路にて良好な結果が得られたので報告する。

2. ケーブルシースの絶縁抵抗

高圧 CV ケーブルのシースには、生産性や絶縁・耐水性からポリ塩化ビニルが使用されている。

シース絶縁抵抗の判定基準は $1M\Omega$ が一般的であり⁽¹⁾、 $1M\Omega$ 未満の場合要注意判定となり、外傷や亀裂、膨潤のような問題が生じていることが懸念される。

従来の点検は線路停止を行なって絶縁抵抗計で測定することが一般的だったが、近年は活線下で常時監視することも行なわれている。図 1 は実際の線路でシースの絶縁抵抗を活線下で常時監視した事例である。活線診断装置としてフジクラ・ダイヤケーブル製測定器 E135 を使用した。

グラフ 1 は $1M\Omega$ 未満まで低下した線路を抽出しているが、高圧 CV ケーブルの最外装であるシースの絶縁抵抗は湿度や周囲との接触状況など環境によって大きく変動することがわかる。絶縁不良個所を特定することを考えたとき、測定には線路を停止する必要があるが、線路停止日に特定が可能なレベルの不良状態になるとは限らないという問題

* 株式会社フジクラ・ダイヤケーブル
〒360-8912 埼玉県熊谷市新堀 1008
Fujikura Dia Cable Ltd.
1008 Nibori, Kumagaya, Saitama 360-8912
** トヨタ自動車株式会社
〒471-8573 愛知県豊田市元町 1 番地
Toyota Motor Corporation
1 Motomachi, Toyota, Aichi 471-8573



図 1 シース絶縁抵抗 実線路測定例

がある。例えば、図 1 に示した線路では、絶縁抵抗の値が 1MΩ 未満となっているのは 3 月、7 月、および 9 月の一部の期間においてのみである。

3. 従来のマレーループブリッジについて

高圧 CV ケーブルの代表的な不良点測定器にマレーループブリッジがある。マレーループブリッジによるケーブルシース不良点検定の原理を図 2 に示す。回路は、不良ケーブル相と他相の各遮蔽層に比例辺抵抗を接続してホイートストンブリッジを構成する。この回路に直流電圧を課電して比例辺抵抗を調整することによりブリッジの平衡を求め、得られた平衡条件から線路全長の遮蔽層抵抗 L と不良点までの遮蔽層抵抗 l の比率を求め、遮蔽層抵抗がケーブルの距離に比例することから算術的に以下のように測定端から事故点までの距離 l を計算するものである。

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{2L-l}{l} \quad \therefore l = \frac{2R_2}{R_1+R_2} \cdot L$$

ブリッジ検流計の入力がゼロになった状態を平衡状態とする。これを活線下で行うには以下の 2 点の問題がある。

- ① 高圧ケーブルの遮蔽層が、端末で接地に接続されている必要がある。
- ② 遮蔽層には負荷電流による循環電流が流れるため、検流計指示の不安定や比例辺抵抗の焼損が生じる。

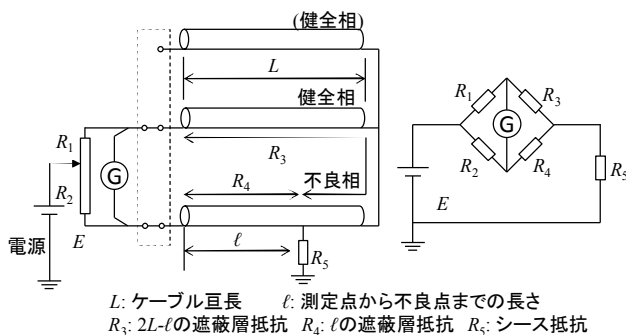


図 2 マレーループブリッジによるシース絶縁不良点測定回路

4. 基本性能

高圧ケーブルのシース絶縁抵抗の判定基準は 1MΩ が一般的であるため、1MΩ 未満の絶縁不良個所の測定を目標とする。測定値は全長に対してのパーセンテージで算出されるが、実用性を考慮し、絶縁不良個所の測定精度は全長の $\pm 1\%$ を目標とする。目標性能を以下にまとめる。

[絶縁不良抵抗]	: 1MΩ 未満
[測定精度]	: $\pm 1\%$
[対象ケーブル電圧定格]	: 3.3kV, 6.6kV
[対象ケーブル線路長]	: 50~2000m
[対象ケーブルサイズ]	: 500mm ² 未満
[遮蔽層循環電流]	: 500mA 以下
[耐入力電圧]	: AC100Vrms 相当

地絡抵抗は小さいほど不良個所に流れる電流が大きくなり、測定器の応答は良化する。一方、線路長については、長いほど測定器の応答は良化するものの、遮蔽層循環電流が大きくなる傾向がある。また、遮蔽層循環電流は大きいほど測定器のオフセットノイズが増加するため測定し難くなるが、負荷電流や線路長に関連があるため、上記の値に含まれない項目があっても他の項目次第では測定可能なケースも考えられる。

5. システム設計

5.1) 交流接地機構

試験電源は直流である一方、活線で試験する際、交流成分については遮蔽層と接地を低インピーダンスに保つ必要があるため、1 相あたり 50~150μF のコンデンサを介して遮蔽層を接地に接続する。静電容量が大きいほど交流に対してより低インピーダンスとなるため、循環電流による誘起電圧が低減するが、直流電圧の充電時間が長くなり、より長く測定に時間を要する。また、コンデンサ故障に備え、保護用に 90V アレスタを並列に接続する。

5.2) 誘導電圧対策

循環電流による誘起電圧は前項の交流接地用コンデンサにより低減された後、比例辺抵抗を備えた測定器に入力される。このとき、比例辺抵抗の容量が不十分であると焼損するおそれがある。比例辺抵抗は精度の高いシャント抵抗 1~512Ω を組み合わせ全体を 1023Ω とし、定格電流 240mA と十分な容量の抵抗を選定する。また、検流計回路部への入力信号について、通過帯域 0.1Hz の RC 多段回路による LPF を備え誘導電圧を低減させ、さらに 1000 回/秒の AD サンプリング後、コンピュータによる演算処理をし、周期的な成分を低減させる⁽²⁾。

〈5.3〉 直流電源

試験電源は直流とし、シース絶縁不良個所に地絡電流を流すが、活線下であり、活線絶縁診断装置と同等の約 DC50V とする。シースを焼損させることがないように制限抵抗 50kΩ を備え、最大出力電流は 1mA とする。

6. 実験装置

〈6.1〉 回路構成

実験装置の回路は図 3 で構成される。

高圧ケーブルの片端接地側の遮蔽層にシース絶縁不良点測定装置の接続切替ボックスを接続する。シース絶縁不良点測定装置はコンデンサによる交流接地機構を備えており、活線時には交流成分は接地される。切り替え時に遮蔽が接地から切り離されないように選択スイッチはオーバーラップ式とする。高圧ケーブルの反対端の遮蔽はボンディングされているものとし、ブリッジ回路は健全相と絶縁不良相の遮蔽層をループして形成される。測定器には誘導電圧対策型の高圧ブリッジ I018（フジクラ・ダイヤケーブル製）を使用する。直流電源はスイッチング電源 DC48V を用い、短絡時の出力電流は最大 1mA である。実験装置の外観を図 4 に示す。

〈6.2〉 動作特性

直流電源から見て後段に交流接地機構としてのコンデンサがあるため、電圧約 48V により充電電流が安定する状態に至るまでは一定の時間を要する。絶縁不良個所に流れる電流以外の充電電流が変化している間はブリッジ

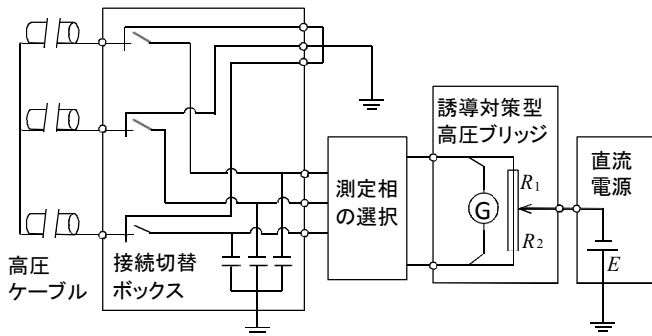


図 3 実験装置接続回路



誘導対策型高圧ブリッジ I018

直流電源

図 4 実験装置外観

表 1 交流接地用コンデンサと測定開始までの時間目安

交流接地用コンデンサ 静電容量 1 相分	50μF	100μF	150μF
時間	30s	60s	90s
インピーダンス at 60Hz 1 相分	53Ω	26.5Ω	17.7Ω

回路の平衡をとることはできず、測定値に誤差を生じることになる。測定器 I018 の検流計の検出感度特性より動作に影響を与える信号レベルを 1μV とし、遮蔽層抵抗を 10Ω と設定すると遮蔽層を流れる電流は 0.1μA となるが、充電電流が 0.1μA 以下まで減衰する時間は、直流電源の出力インピーダンスを 50kΩ とした時に表 1 の通りである。交流接地用コンデンサの静電容量が大きいほど低インピーダンスとなるため、測定器に入力される誘起電圧を抑えることが可能であるが、測定開始までに要する時間は延びる傾向となる。また、測定器 I018 を安定的に動作させるために必要な入力信号を 100μV とし、遮蔽層抵抗を 10Ω と設定すると遮蔽層を流れる電流は 10μA となるが、直流電源は 48V であるため、絶縁不良個所の絶縁抵抗の上限は 4.8MΩ 程度となる。

〈6.3〉 模擬実験結果

ケーブルを対象としたフィールドテストの前に、ケーブルの代わりに模擬抵抗を用いて、検証試験を行なった。

ケーブルの場合、負荷電流や長さに応じた誘導電圧が存在するため、模擬抵抗に絶縁変圧器を接続し、商用周波電圧を重畳して模擬した。模擬実験回路を図 5 に示す。

試験条件は以下のとおりである。

- [模擬抵抗] : 7.25Ω
- [誘導電圧] : 0~30V
- [地絡抵抗] : 100kΩ~4.7MΩ

試験結果を表 2 に示す。地絡抵抗および誘導電圧を変化させて測定したが、地絡抵抗が大きいほど地絡電流が流れず、ブリッジ回路の検流計部に入力される信号が小さくなるため測定しがたくなる。また、誘導電圧が大きいほど検流計部に入力される交流成分が大きくなるため測定しがたくなる。そのため、最初に誘導電圧 0V、地絡抵抗 0Ω としたときの測定値 65.2% を基準値として扱い、基準値と比較して、差異が±1%に入っていない範囲を色塗りで示している。

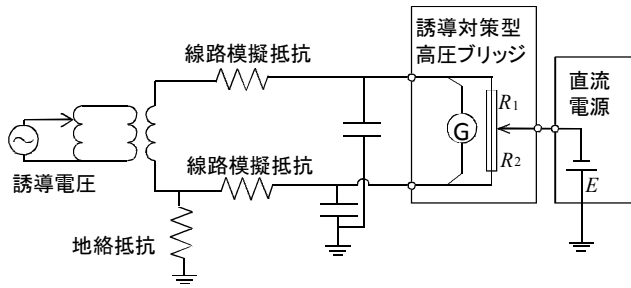


図 5 模擬実験回路

表 2 模擬実験結果

地絡抵抗 誘導電圧	100kΩ	510kΩ	1MΩ	4.7MΩ
0V	65.0%	65.3%	66.1%	66.2%
5V	65.2%	65.8%	66.1%	72.3%
10V	64.7%	64.3%	66.4%	
15V	65.6%	65.8%	63.5%	
20V	65.6%	65.6%		
25V	65.2%	64.2%		
30V	66.1%	69.5%		

誘導電圧を 30V まで上昇しても地絡抵抗が 100kΩ の場合は精度よく測定が可能であった。地絡抵抗が判定基準相当の 1MΩ の場合、誘導電圧 15V から特に誤差が大きくなった。

〈6・4〉 フィールドテスト

高压ケーブル実線路を対象としたフィールドテストとして、表 3 に示す 2 つのケースで、通電中のシース絶縁抵抗不良個所の測定を行なった。なお、不良箇所は、過去に発生した不良箇所の補修テープを剥ぎ取り、可変抵抗器を介して接地し、シース絶縁抵抗を可変出来る様にして再現させた。B 線路は A 線路より誘導電流および誘導電圧が高くなるため、測定条件は厳しくなる。

評価のポイントは、実用性から以下 2 点とした。

- 評価項目①：真値に対する誤差が±1%以内か。
- 評価項目②：シース絶縁抵抗 1MΩ を測定できるか。

表 3 実験線路比較

線路名	A 線路	B 線路
負荷	小負荷	単一負荷
送電電圧(V)	6600	6600
負荷電流(A)	13	227
遮蔽層誘導電流(mA)	74	216
遮蔽層対地間誘導電圧(V)	0.83	5.1

[A 線路測定結果]

ケーブル仕様：6600V-cu-CVT-3C-60sq-400m
 不良箇所：変電所～296m 真値 74%
 結果：シース絶縁抵抗 1MΩ を±1%以内で測定できた。
 図 6 に測定結果を示す。なおグラフ内において、縦の点線は 1MΩ、横の点線は±1%を示す。

[B 線路測定結果]

ケーブル仕様：6600V-Cu-CVT-3C 325sq 372m
 不良箇所：変電所～322m 真値 86.6%
 結果：シース絶縁抵抗 1MΩ を±1%以内で測定できた。
 図 7 に測定結果を示す。

ターゲットに該当する A,B 線路については、通電中であっても 1MΩ 以下のシース絶縁抵抗が精度よく測定できることが確認できた。

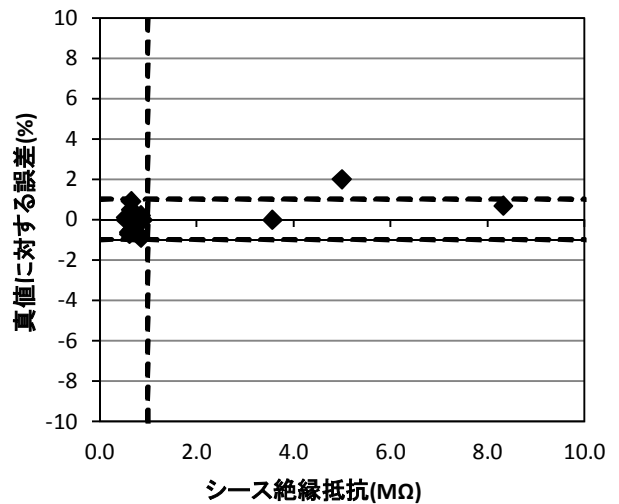


図 6 A 線路測定結果

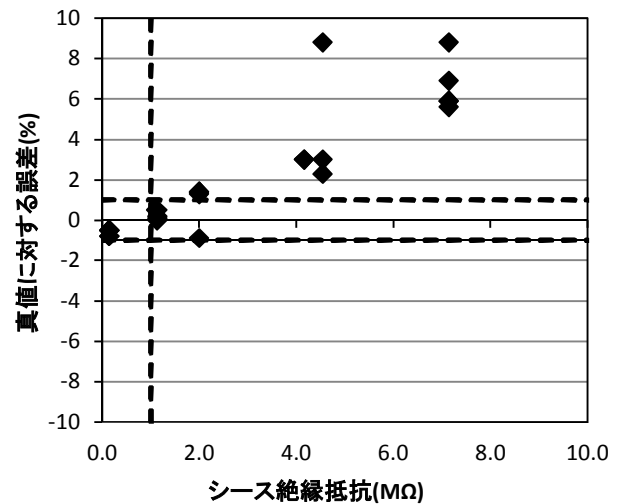


図 7 B 線路測定結果

〈6・5〉 適用限界

シース絶縁抵抗の判定基準である $1M\Omega$ 以下の絶縁不良個所の測定には実用的であるが、動作特性に記載したように数 $M\Omega$ になると、線路抵抗や誘起電圧の大きさなど他の要素も関係するが、測定し難くなる。

また、線路の遮蔽層抵抗の比率で測定しているが、一般的に $500mm^2$ 以上の線路で遠端をボンディングする場合、 100Ω 程度の制限抵抗を接続するため、仮に遮蔽層の抵抗を 10Ω とした場合、測定値の 9 割程度は制限抵抗分となり、精度が低下する。(誤差が 10 倍程度大きくなる。)

また、シースの不良個所が複数存在した場合、複数個所を同時に特定することは不可能である。測定値は、最も絶縁抵抗の低く、より電流が流れた個所となる。ただし、不良個所の絶縁抵抗の値に差異が少ない場合、測定値はその間を示すため、特定はより困難となる。

7. 試作品仕様

今回の実験結果を受けて製作した活線シース絶縁不良点測定装置(型式:LILIA-150T)の試作品の仕様概要を表 4 に示す。

交流接地部のコンデンサについては 1 相あたり $150\mu F$ としたが、停止線路での測定や負荷電流が少なく誘起電圧の影響が少ない場合、測定時間が短縮できるように $50\mu F$ にも切替可能とした。また、コンデンサに充電された電圧を衝撃なく安全に放電するため、放電抵抗を備えた。

測定器部は実証試験で使用した誘導対策型ブリッジ I018 と構造を同等としたが、軽量化するため、耐誘導電圧を AC100V に抑え、測定辺抵抗の定格電流を 120mA と低容量化した。(I018 は耐誘導電圧 AC200V、定格電流 240mA。)

また、接続替えが容易となるように測定器内部に測定相の切替回路を追加した。



装置本体 LILIA-150T



入力切替部 LILIA-151T

図 5 活線シース絶縁不良点測定装置外観

I018 は、主絶縁地絡事故にも使用される事故点測定器であり、通常 DC10kV 50mA の大容量高圧電源と組み合わせて使用される。今回開発した装置は電源電圧を 50V に抑えたスイッチング電源であるため、低容量かつ小型化することができ、測定器内部の絶縁隔離も少なくできることから電源装置と測定装置を一体化し、機器間の配線もなく重量も 15kg 程度の可搬構造とし、取扱性を向上させた。既存の活線絶縁診断装置との入力切替部はオーバーラップ形のスイッチとし、切り替え時に交流接地が切り放されないように配慮した。高圧ケーブルのキュービクル内部に配置できるように小型寸法とした。また、測定装置と入力切替部はメタルコネクタ接続とし、取扱性を向上させた。試作品の外観を図 5 に示す。

8. まとめ

活線下で高圧ケーブルのシース絶縁不良個所を特定する測定装置の実験装置を製作し、実線路で評価を行なった。

- ・ 負荷電流が 200A 程度、遮蔽層循環電流が 200mA 程度の線路でも $1M\Omega$ 以下のシース絶縁抵抗不良点は誤差

表 4 装置の仕様概要

交流接地部	コンデンサ	$150\mu F \times 3$
	放電抵抗	$1k\Omega$
測定器部	測定方式	マレーループブリッジ
	測定辺抵抗	1023Ω 120mA, リレー切替型
	測定相切替	R-S, R-T, S-T, 3レンジ
	最小目盛	0.1%
	耐誘導電圧	最大 AC100V
	雑音除去方式	LPF, デジタルノイズ除去方式
直流電源部	方式	スイッチング方式
	電圧	DC 50 V
	最大出力電流	1mA, 短絡時
装置本体	入力電源	AC 100V, 50/60Hz, 約 10VA
	寸法・質量	$300W \times 295H \times 350D$, 約 15.2kg
入力切替部	スイッチ	オーバーラップ形, 3回路, キースイッチ
	寸法・質量	$200W \times 120H \times 120D$, 約 2kg

1%以内で特定でき、良好な特性が得られた。

- ・ 上記線路条件で誤差を 10%程度まで許容すればシース絶縁抵抗が $10\text{M}\Omega$ 程度であっても特定は可能である。
- ・ A 線路、B 線路以外にも、送電電圧 11kV、負荷電流 500A、遮蔽層循環電流 1500mA の回路について、フィールドテストを行ったが、この条件ではシース絶縁抵抗が $0.1\text{M}\Omega$ 以下でないと実用的な測定値は得られなかった。また、このとき遠端は制限抵抗が接続されており、測定の分解能も低下した。

実線路での評価後に軽量化、操作性の検討・改良を行い試作品を製作した。なお、停止線路では誘起電圧の影響を受けないため、より短時間かつ高精度での測定が可能である。今後、実線路での使用経験を重ねて、より優れた装置に発展させたい。

文 献

- (1) 「高圧 CV ケーブルの保守・点検指針」, (一社)日本電線工業会技資 116D, p.36 (2012-2)
- (2) S.Isono et al., : “Development of Murray Loop Bridge for High Induced Voltage”, T.IEE Japan, Vol.123-B, No.9 pp.1411-1420(2003)(in Japanese)
磯野 重樹, 他 : 「誘導対策型マレーループブリッジの開発」, 電学論 B, 123,11, pp.1411-1420 (2003)