

直流手動断路器 誤操作防止装置の開発



石井 喬文*



関島 志郎**



堀口 晃*

車両基地では留置線ごとに電区分する必要があるため、複数の断路器が集中的に設置されている。ここで、検修作業の際に負荷電流が流れている状態のまま、誤って断路器を操作してしまうトラブルがまれに発生している。この原因として操作時の安全確認が人間の注意力のみに依存していることが挙げられる。この誤操作を防止するため、断路器操作の可否を判定し、操作可能な条件を外部に出力する装置を開発した。誤操作防止装置の原理として、フィールドでの測定結果を踏まえ、断路器に流れる微小な電流を磁気センサで検出し、電流値があらかじめ設定した閾値以下になったときに「断路器操作可」とする方式を採用した。ここでは、微小な電流を測定する磁気センサの選定、直流手動断路器誤操作防止装置の試作、フィールドでの動作確認試験を行ったので、それらの概要について紹介する。

●キーワード：直流手動断路器、ホール素子センサ、シーケンサ

1. はじめに

直流手動断路器は、パンタグラフの点検などで架線に接触する恐れのある作業から感電事故を起こさない安全な作業環境を作ることを目的に設置されており、作業場所の電気回路を確実に切り離し、停電させるための電力機器である。しかし、断路器に電流が流れている状態で切り離す操作を行うと、断路部にアークが発生し溶損するほか、感電事故につながる危険もある。断路器はもともと負荷電流を開閉するための機器ではないため、電流が流れているときに開閉操作をしてはならない。図1のような断路器に電流が流れている状態での操作は誤操作であり、俗に“生切り”と呼ばれている。

ここでは、“生切り”を防止するために開発した直流手動断路器誤操作防止装置（以下、誤操作防止装置）について紹介する。

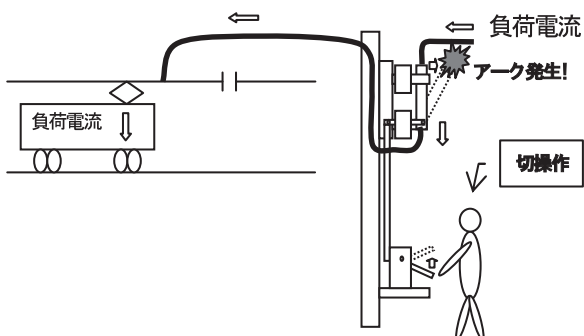


図1 断路器の“生切り”

2. 開発の背景と目的

車両基地では留置線ごとに電源を区分する必要があるため、図2のように複数の手動断路器が集中的に設置されている。



図2 直流手動断路器の設置状況

このような場所で誤操作を回避する手順として、次のことを確認した上で操作している。

- (1) 当該の留置線に在線する車両の全パンタグラフが降下していること
- (2) 当該の留置番線と断路器番号が一致していること

この確認作業は人間の注意力に依存しているため、まれにヒューマンエラーによる誤操作事故が発生している。

開発した誤操作防止装置の目的は、断路器に流れる電流値を測定し、あらかじめ設定した閾値以下になったときに、「電流値が閾値以下の状態=パンタグラフ降下の確認」の条件を外部出力することである。

また、断路器には、インターロック装置という機械的にロックをかけて操作不能とする機構を付加できる。この機構は、ある条件が成り立つときにロックがかかり誤操作を抑止するものである。この機構と組み合わせることで、より安全性向上が図られる。

3. パンタグラフ昇降状態の検知方式

3.1 検知方式検討のための予備測定

パンタグラフの昇降状態を判断する方式の検討を行うため、長野総合車両センターの15番線において、き電線電流やレール対地電圧などの予備測定を行った。図3、4に測定概要図と測定状況を示す。

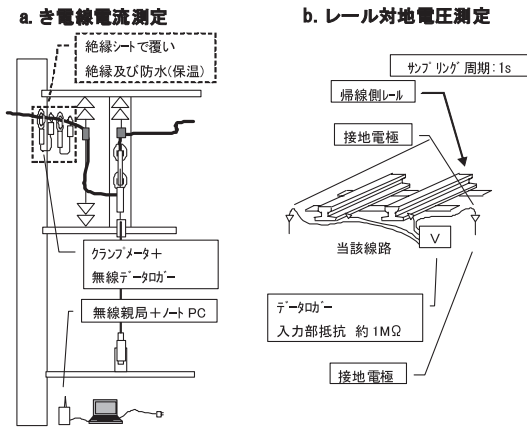


図3 測定概要図

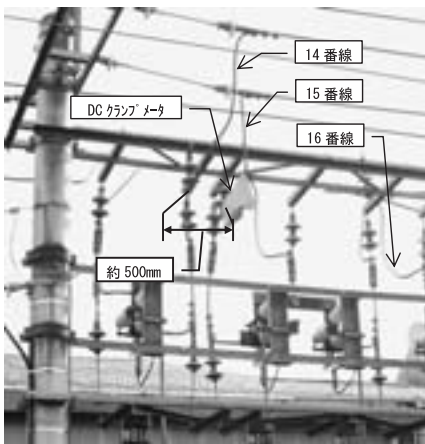


図4 測定状況

き電線電流は、15番線のき電線にDCクランプメータ（フルスケール2000A）を取り付け、レール対地電圧は、2本のレールそれぞれに電圧計（データロガー）を設置して、それぞれ測定を行った。

測定期間中の電車在線状況、負荷状況を表1示す。なお、留置中の電車のパンタグラフは上げた状態であり、補助電源機器（以下、補機）を運転させている。

表1 測定期間中の負荷状況（15番線）

日付	時刻	状況	在線車両	記事
12/18	14:08	測定開始	115系 2M1T	
12/18	14:50	車両発車	115系 2M1T	
			在線なし	
12/18	19:24	16番線車両入線		115系 2M1T
12/18	19:40	車両入線	189系 4M2T	
12/18	19:57	16番線車両発車		115系 2M1T(推定 500A)
12/19	4:19	車両発車	189系 4M2T	
			在線なし	
12/19	7:05	16番線車両入線		189系 4M2T
12/19	9:43	14番線車両入線		115系 2M1T
12/19	10:10	16番線車両発車		189系 4M2T(推定 1000A)
12/19	11:02	車両入線	115系 2M1T	補助電源はSIV
12/19	11:18	作業検査開始	115系 2M1T	
12/19	11:26	暖房切	115系 2M1T	ドアヒーター類は投入
12/19	11:27	起動試験(1N)	115系 2M1T	
12/19	11:28	パンタ点検	115系 2M1T	パンタ降下、断路器開放
12/19	11:32	パンタ点検終了	115系 2M1T	断路器投入、パンタ上昇
12/19	12:58	14番線車両入線		115系 2M1T 併結
12/19	13:19	暖房入	115系 2M1T	
12/19	14:09	14番線車両発車	115系 2M1T	115系 4M2T(推定 1000A)
12/19	14:36	出区前点検	115系 2M1T	
12/19	14:51	車両発車	115系 2M1T	
			在線なし	

3.2 き電線電流

電車が在線していない状態で、き電線電流を測定した結果を図5に示す。き電線電流は、ほぼ0Aであり変動がないことがわかる。

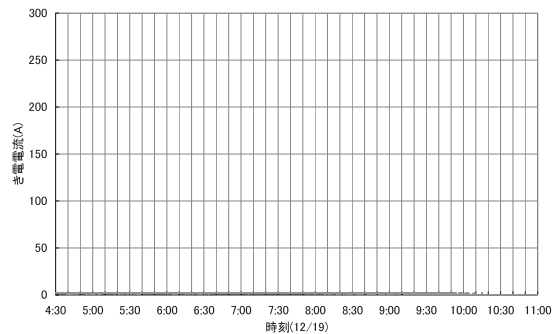


図5 き電線電流 [15番線] 電車在線なし

次に、電車が在線している状態でき電線に流れる補機電流を測定した結果を図6～8に示す。

ここでの最小補機電流は、115系2M1Tの在線で暖房を切った条件で4Aであった。最大負荷電流は、189系4M2Tが発車する時の力行電流で1036A、継続時間は約10秒程度

であった。また、隣の14番線から115系4M2Tが発車した時の15番線の補機電流波形（189系4M2T）を図9に示す。隣接回線の起動電流として、約1000A流れたと推定されるが、このとき15番線では、3秒程度の間、誘導による10A相当のノイズが見られた。

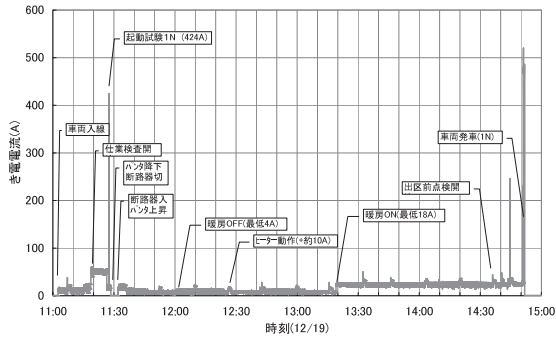


図6 き電線電流 [15番線] 115系2M1T (長時間)

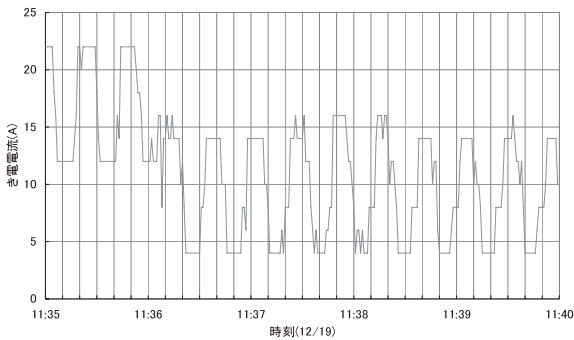


図7 き電線電流 [15番線] 115系2M1T (短時間)

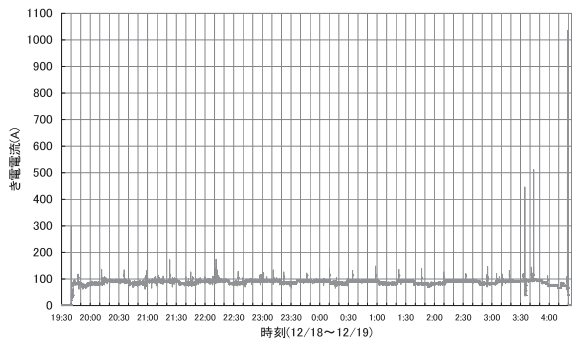


図8 き電線電流 [15番線] 189系4M2T

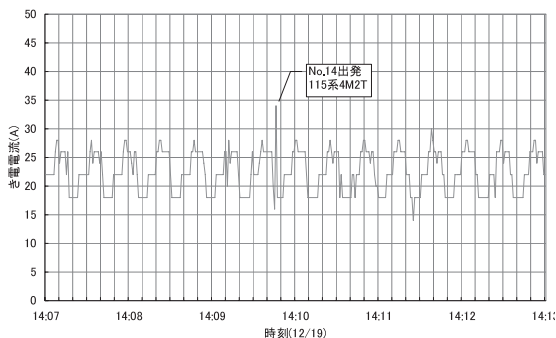


図9 き電線電流 [15番線] 189系4M2T

測定結果より、無負荷時のき電線電流はほぼ0Aで安定しており、最小補機電流が4A程度であることが分かった。このため、数Aレベルを測定できれば、パンタグラフの昇降状態を検知する条件に適用できるものと考えられる。

3.3 レール対地電圧

帰線側のレール対地電圧の測定結果を図10に示す。比較のため、このき電線電流を図11に示す。

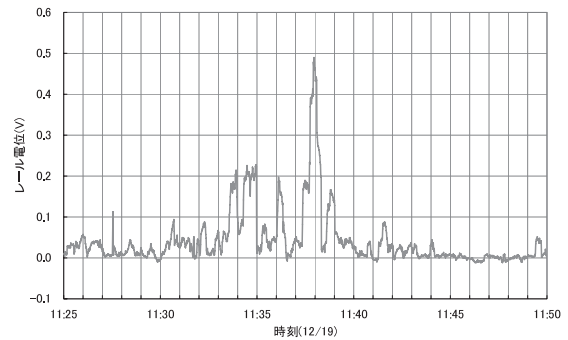


図10 レール対地電圧の変化

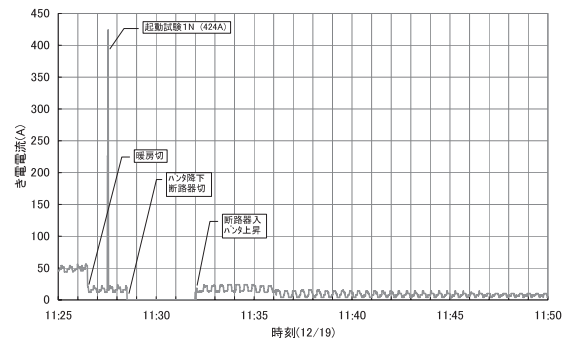


図11 き電線電流の変化

図10、11より、レール対地電圧の変化については、当該回線の負荷電流の変化との有意な相関が見られなかった。したがって、パンタグラフの昇降状態を判断する条件としてレール対地電圧は適当ではないと考えられる。

3.4 予備測定のまとめ

予備測定の結果、以下の知見が得られた。

- (1) き電線電流の閾値を数Aに設定できれば検知可能
- (2) 補機電流ではレール対地電圧に相関が見られない

これらを踏まえ、き電線電流の大きさを最小補機電流通電状態と無負荷状態を判断する方式を採用することとした。ここで、電車力行時に最大電流が約1000A、10秒程度通電する環境にあることを留意する必要があることも分かった。

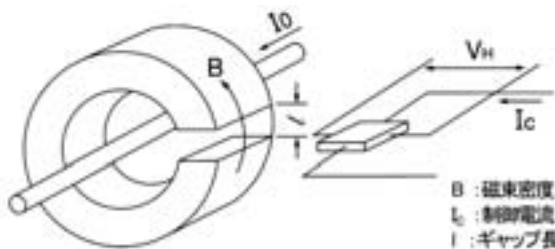
4. 電流検出用センサの選定

本開発は過去にも取り組まれた事例があり、そこでの問題点を整理した上で試作器の仕様を検討した。開発のポイントは、電流検出用のセンサにある。求められる要件は、小型・軽量、使用温度範囲が $-30\sim+60^{\circ}\text{C}$ 、ノイズの影響を受けにくいことなどが挙げられるが、もっとも重要なことは、電車起動時の1000Aを超える電流が間欠的に流れる環境において、数A程度の微小な電流が測定できることである。そして、もちろん経済的でなければならない。

さまざまな検出原理のセンサが考えられるが、精度がよく、経済的なホール素子センサを採用することとした。表2に検討したセンサの比較、図12にホール素子センサの原理を示す。

表2 誤操作防止装置用電流センサの比較

センサ	精度	経済性	記事	(参考)仕様
ホール素子	◎	○	・小電流領域の誤差が小さい ・非接触で測定可能	50A / 5V
シャント抵抗	△	◎	・小電流領域は測定できない ・非接触で測定不能	2000A / 100mV
光ファイバ	△	△	・小電流領域の誤差が大きい ・非接触で測定可能 ・ノイズに強い	20kA / 10V



貫通電流 I_c に比例した磁束は鉄芯で収束され、ギャップに挿入されたホール素子を通し、ホール効果によるホール電圧 V_H を発生する。

図12 ホール素子センサの原理

ホール素子センサの採用においても、大電流による残留磁気の影響でゼロ点の出力電圧（電流値が0Aの時の出力電圧）が0Vに戻らなくなるなど、数Aの領域における測定精度を考慮する必要があったため、表3に示す事柄について留意した。

表3 ホール素子センサを使用するにあたり考慮した事柄

項目	内容
ホール素子の材料	温度特性に優れたホール素子を選定した
ホール出力電圧	ホール出力電圧を増幅してセンサ出力(0~5V)を確保する誤差を小さくするため、ホール出力電圧が大きい素子を選定した
磁路材	10A以下のヒステリシス特性を向上するため、パーマロイとした
構造	外部磁界の影響を受けにくくするため、貫通型とした
動作原理	ホールセンサ出力をフィードバックコイルに帰還させ、鉄芯をゼロ磁束とするサーボアンプ方式とした

5. 誤操作防止装置の構成

誤操作防止装置は、電流を検出して断路器操作の可否を判定するものである。電流検出部と情報処理部、それらを結ぶ制御線および操作許可表示灯にて構成される。

開発品の取り付けイメージを図13に示す。

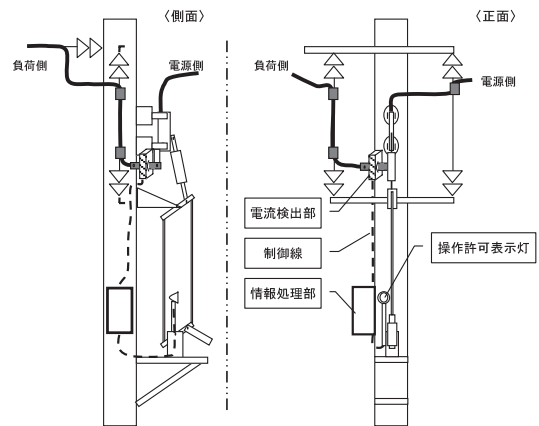


図13 開発品の取り付けイメージ

5.1 電流検出部

電流検出部は、電流センサを防水とするため、箱に格納し十分な絶縁強度を持たせたものである。

電流センサの測定範囲は $0\sim+50\text{A}$ で、測定精度は 25°C 一定のもとで、10A時点で $\pm 5\%$ である。懸念していた1000Aを超える電流が流れた後のゼロ点のズレは、仕様では $\pm 1\text{A}$ 以内としたが、0.4A程度となった。試作した電流検出部と電流センサの写真を図14、15に示す。

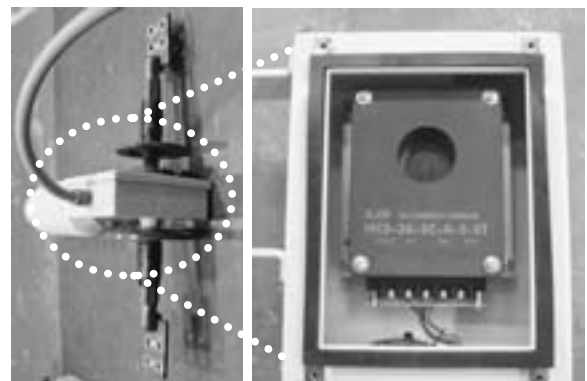


図14 電流検出部

図15 電流センサ

5.2 情報処理部

情報処理部の役割は次の3点である。

- (1) 電流センサに $\pm 15\text{V}$ の電源を供給
- (2) 測定値と閾値を比較し、無電流を判定
- (3) 判定結果をインターロック装置に出力

このほか開発の背景で述べたが、複数の手動断路器を集中的に設置している特徴があるため、1つの情報処理部で5回線分の機能を持つように考慮した。5回線分の情報処理部をコンパクトに構成するため、シーケンサを使用した。そのため、シーケンサの周囲が許容温度以内となるように熱対策を講じたキャビネットを採用した。試作した情報処理部の写真を図16、17に示す。

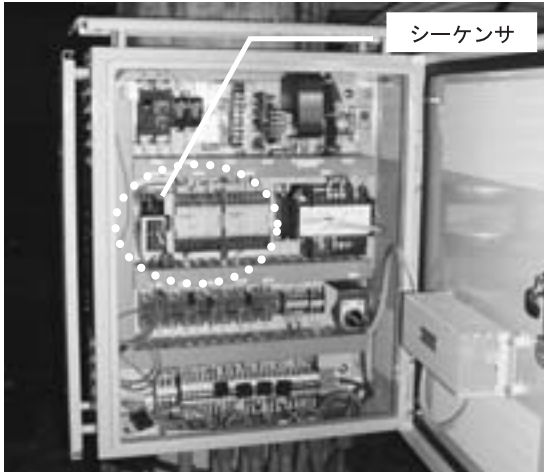


図16 情報処理部 (内部)



図17 情報処理部 (外観)

6. 試作品の機能確認試験

試作した装置を長野総合車両センターの17番線に仮設し、パンタグラフ昇降状態を無負荷時と最小補機電流時の境界で判定できるか動作確認試験を実施した。在線させた電車は予備測定の時と同じ115系2M1Tである。試作した誤操作防止装置の仮設状況を図18に示す。

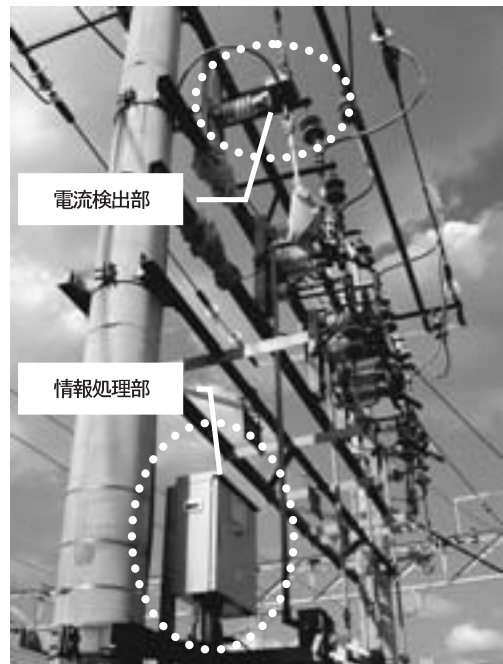


図18 誤操作防止装置の仮設状況

6.1 閾値の設定

閾値は、パンタグラフを降下させて断路器操作が可能な無負荷状態とパンタグラフを上昇させて車両側で補機電流を最小に抑えた状態の中間に設定できればよいため、それぞれの電流値を測定した。無負荷時、および補機電流最小時の電流波形を図19~22に、測定結果を表4に示す。

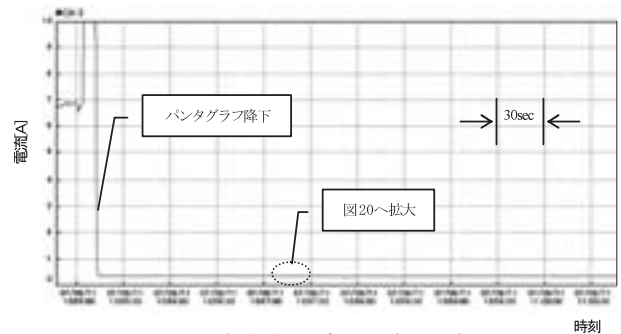


図19 無負荷時測定電流 (長時間)

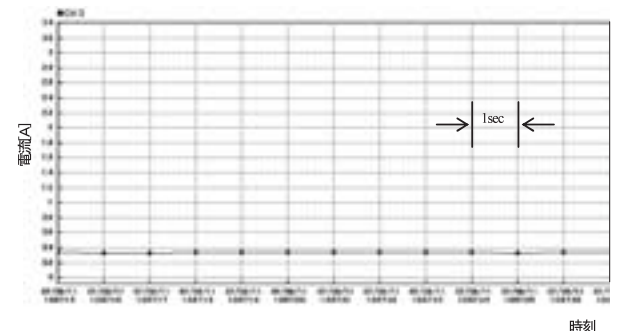


図20 無負荷時測定電流 (短時間)

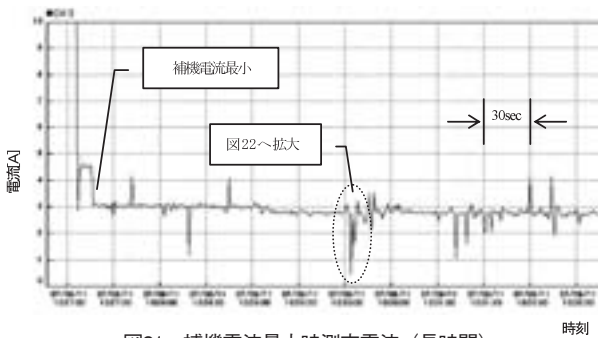


図21 補機電流最小時測定電流（長時間）

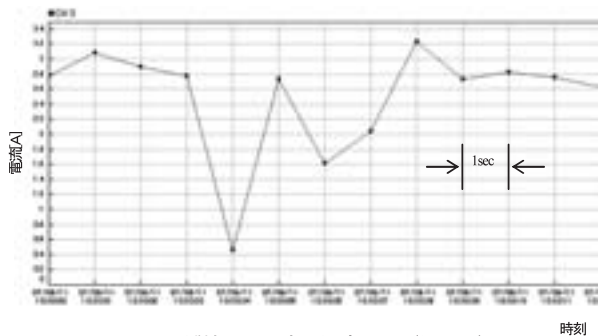


図22 補機電流最小時測定電流（短時間）

表4 電流測定結果 [17番線] 115系2M1T

測定時の状況	試作品 電流センサ 測定値
無負荷 (パンタグラフ降下)	0.33 ~ 0.34 [A]
補機電流最小 (パンタグラフ上昇)	平均 2.84 [A]

無負荷時の電流測定値は、最小0.33A、最大0.34Aで変動がなく安定した値であった。補機電流最小時の電流測定値は、平均2.84Aであった。ここで、2秒以内の瞬時値であるが、最大±2.5A程度のノイズが入ることも分かった。そのため、閾値の設定は電流値だけでなく、時間の閾値も設定可能な仕様とした。

今回のフィールド試験では“1.5A、3秒”をパンタグラフが降下したと判断する条件の閾値に設定した。

6.2 総合機能確認 (1)

2007年12月から2ヶ月間、検修担当の社員が実際に断路器を操作する中で、試作品の動作（電流が流れていない事で操作許可表示灯が点灯）を確認してもらい、期間中すべての操作において正常に動作し、誤った判定がないことを確認した。また、約半年間フィールドに据え付けた試作品を持ち帰り、防水や絶縁などが良好であることも確認できた。なお、このときの情報処理部は1回線分のみの試作品であり、シーケンサを使用していない。

6.3 総合機能確認 (2)

2008年8月からシーケンサを使用した5回線分の機能を集約した情報処理部をフィールドに設置してキャビネット内部の温度測定を行い、シーケンサの許容温度以内であることを確認した。2008年度末まで動作確認試験を行う予定である。

7. まとめ

長野総合車両センターで、き電線電流やレール対地電圧などの各種試験測定を行った。この結果、き電線電流の閾値を4A以下に設定できれば、パンタグラフの昇降状態を検知できることが分かった。また、補機電流程度ではレール対地電圧とき電線電流の相関は見られなかった。これより、断路器操作の許可を判断する方式としてき電線電流の大きさをうい、電流が閾値以下でパンタグラフの降下を判断する方式とした。

電流センサとしてコストと耐久性に優れるホール素子を使用したものを開発した。そして実車試験を行い、大電流による残留磁気の影響を受けずに4A以下の小電流を測定できることなど、センサの基本原理を確認できた。

8. 今後の予定

現在、実用化へ向けて情報処理部コンパクト化のため、情報処理部を5回線分共有化した試作器の動作確認試験に取組んでいる。誤操作防止装置の開発が完了した後、インターロック装置と組み合わせて設備することにより安全性向上に寄与できるものとする。