

駅内直流配電システムに向けた 短絡／地絡保護手法の検討

竹内 勇人*
Hayato Takeuchi
福野 研一*
Kenichi Fukuno
地道 拓志†
Takushi Jimichi

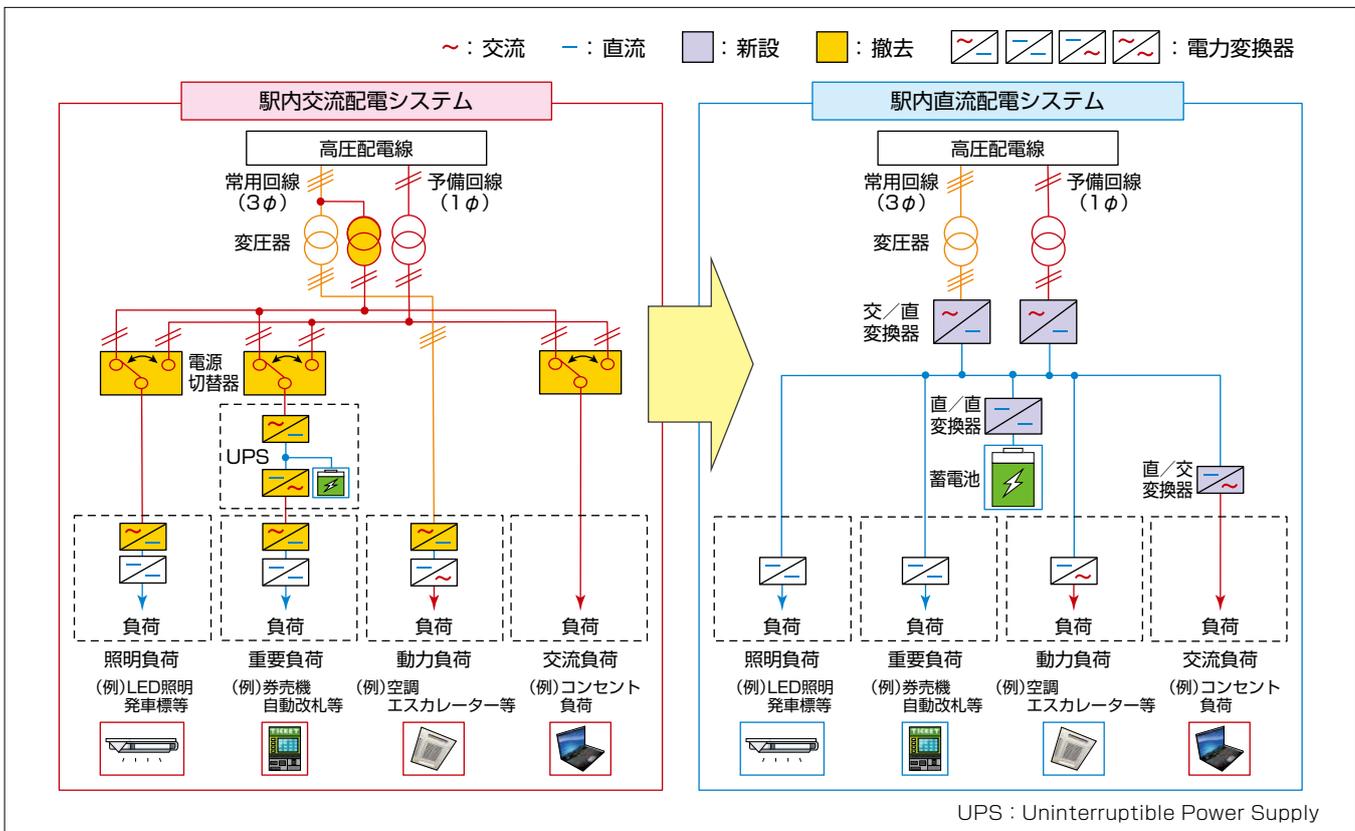
藤田 敬喜‡
Keiki Fujita
藪田 洋平§
Youhei Sonoda

Study on Short-circuit and Ground-fault Protections in DC Distribution System for Stations

要 旨

現在、駅内配電は変圧や保護が容易な交流配電が採用されている。近年、駅では営業時間内の停電がサービス上許容できない出改札機器や、エスカレーター等の電力変換を多用する電機設備が増備され、配電設備が複雑化するとともに電力変換による電力損失が増加する傾向にある。また、無停電電源装置や電源切替器等の高価な停電対策が整備されていない駅に停電リスクが残存している。そこで、電力変換の電力損失の抑制、安価な停電対策の実現を目的とした直流配電の可能性を探るため、“電源の信頼性向上”“設備の簡素化”“省エネルギー”を検討課題として駅内配電システムの開発を西日本旅客鉄道(株)と共に進めている。これまで駅内直流配電システムに省エネルギー効果があること

を確認したが、さらに“電源の信頼性向上”に向けて駅内直流配電内の短絡／地絡保護手法の検討を行った。短絡保護の課題のうち“充電状態の負荷内部コンデンサ容量や寄生容量に起因した放電電流による健全回線の配線用遮断器やヒューズが誤遮断”について検討し、駅電機設備の電力変換器を用いた所内人工短絡試験で収集した電圧電流波形データを基に、短絡シミュレーションモデルを確立した。また、地絡保護装置を用いた地絡保護を検証し、地絡保護装置は地絡回線の分岐数が多いと誤動作し、健全回線の分岐数が多いと、誤動作する可能性があることを確認し、これらの発生を防ぐ最大分岐線数の算出法を導出した。



駅内配電システムの直流化の概念図

従来の駅内交流配電システムを直流化した場合の概念図を示す。現在の駅内配電方式は交流を標準としており、受電した交流電源を受電設備から各駅電機設備に“交流”で配電する。一方、駅内配電の直流方式は受電した交流電源を直流変換して各駅電機設備に“直流”で配電する。駅内配電システムの直流化によって、“電源の信頼性向上”“設備の簡素化”“省エネルギー”の実現が期待される。

1. ま え が き

駅内配電での三つの課題(電源の信頼性向上, 設備の簡素化, 省エネルギー)の課題に対して, 配電システムの直流化による課題の解決を西日本旅客鉄道(株)と共に目指している。駅内配電システムの直流化によって省エネルギー効果を見込めることを定量的に示している⁽¹⁾。

従来の交流配電システムを直流化した場合の概念図を2回線受電している駅を例にして図1に示す。現在の駅内配電方式は交流を標準としており, 受電した交流電源を受電設備から各駅電機設備に“交流”で配電する。一方, 駅内配電の直流方式は受電した交流電源を直流変換して各駅電機設備に“直流”で配電する。

駅内配電システムの直流化には, 技術面及び法制度・関連規格面の課題がある。

技術面の課題は次のとおりである。

- (1) 省エネルギー効果の定量化
- (2) 電力変換器の変換損失の削減(電力変換の高効率化)
- (3) 導入費用の削減(既存の電機機器の再利用)
- (4) 直流配電内の短絡／地絡保護協調の確立
- (5) 配電線, 電力変換器, 蓄電池の仕様の決定

また, 法制度・関連規格面の課題は, 直流向け法制度や関連規格の整備である。

本稿では“直流配電内の短絡／地絡保護協調の確立”に向けた取組みについて述べる。

2. 短絡保護手法の検討

2.1 短絡保護に関わる問題点

短絡保護に関わる問題点は次のとおりである。

- (1) 短絡電流による電力変換器の保護機能(動作停止)で, 電力変換器の二次側が全停電に至る(図2)。
- (2) 充電状態の負荷内部コンデンサ容量や寄生容量に起因した放電電流(以下“負荷側放電電流”という。)によって

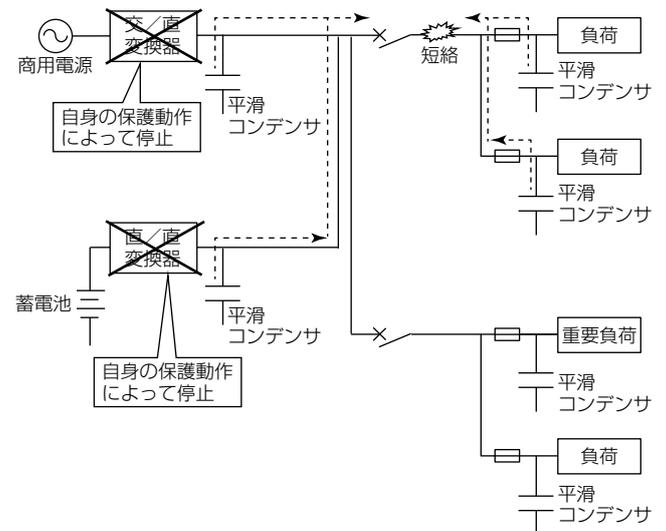


図2. 短絡保護に関わる問題点(1)(現在)

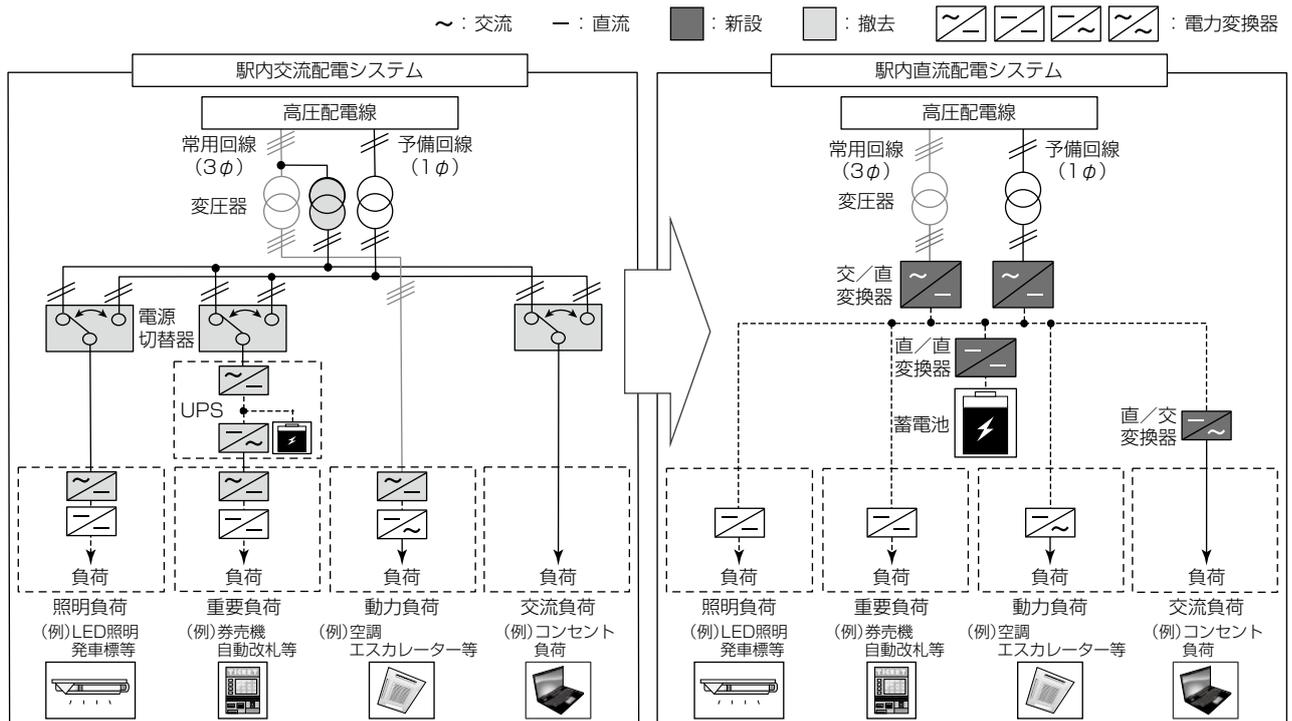


図1. 駅内配電システムの直流化の概念図

健全回線の配線用遮断器やヒューズが誤遮断する可能性がある(図3)。

- (3) 短絡事故発生から事故回線の配線用遮断器やヒューズが短絡電流でトリップするまでの時間、配電電圧が低下することによって、健全回線内の負荷の動作に影響を与える可能性がある(図3)。

問題点(1)に対して、短絡時の保護協調を実現するためには、交流系統のように短絡時にも継続的に短絡点へ電力を供給して短絡事故回線だけを分離させる必要がある。継続的に電力供給する方法として、電力変換器に短絡電流抑制機能を具備させたり、ダイオード整流器を用いたりする方法が考えられる。将来、問題点(1)が克服された際に問題点になるのが問題点(2)(3)である。問題点(2)に対しては負荷側放電電流で誤遮断しない配線用遮断器やヒューズを選定する必要があり、問題点(3)に対しては負荷の許容最低電圧等を加味した保護協調をとる必要がある。

2.2 短絡保護の検討

2.1節の三つの問題点のうち、問題点(2)に対する解決策について述べる。具体的には、駅電機設備の電力変換器を対象に所内人工短絡試験で収集した電圧/電流波形データからモデル駅の短絡シミュレーションモデルを作成するとともに、これを用いて負荷側放電電流による健全回線の誤遮断を招かない短絡保護装置の設定方法を検討した。

2.3 短絡保護の実施内容

次のとおりモデル駅を設定の上、短絡シミュレーションモデルを作成して短絡保護動作の健全性を確認した。

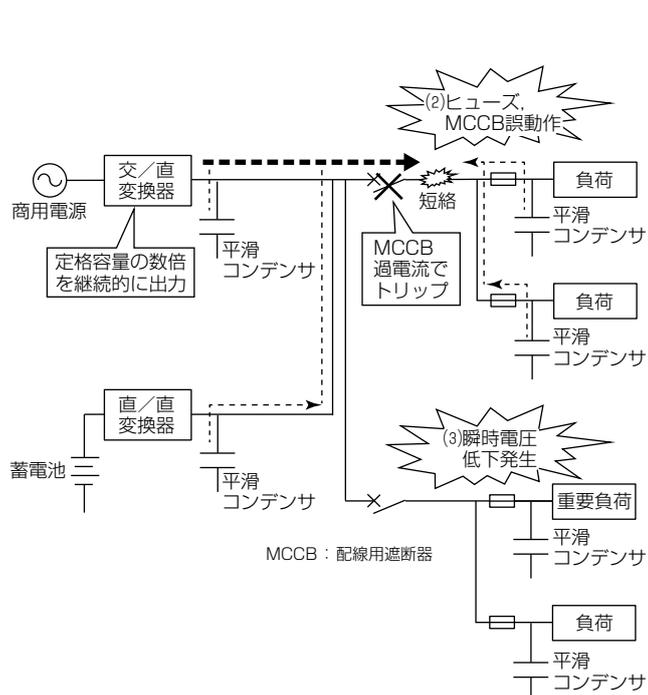


図3. 短絡保護に関わる問題点(2)(3)(将来)

2.3.1 モデル駅の設定

小規模駅(地上駅・1面2線ホーム)をモデル駅に設定した。このモデル駅の配電ブロック図は図4とし、交/直変換器から直流母線、幹線用分電盤、幹線、分岐線用分電盤、分岐線、負荷の順に電力供給する。

2.3.2 短絡事故シミュレーションモデルの作成

次のとおり、Powersim社の電気回路シミュレーションソフトウェアPSIMを使用して、直流配電内の短絡シミュレーションモデルを作成した。

(1) 短絡シミュレーションモデルの前提条件

短絡シミュレーションモデルの前提条件を次のとおりとした。

- ①今回、負荷側放電電流による影響を最大にするため、母線の交/直変換器を直流電源に等価とし、各駅電機設備を無負荷状態とする。
- ②幹線用分電盤で照明負荷(LED照明やLED発車標等)回線、重要負荷(券売機と自動改札機)回線に分岐するものとし、分岐用分電盤で各負荷設備に分岐するものとする。また、両分電盤内の全回線には過電流保護装置が設置されているものとする。
- ③幹線及び分岐線の線種には一般的に駅に導入されている“600V CV-T38mm²”及び“600V VVR8mm²”を選定する。また、幹線及び分岐線の長さを“10m”に設定することとする。これは現実的に最短と思われる数値であるが、短絡保護の検討で、配線長が短い(配線イ

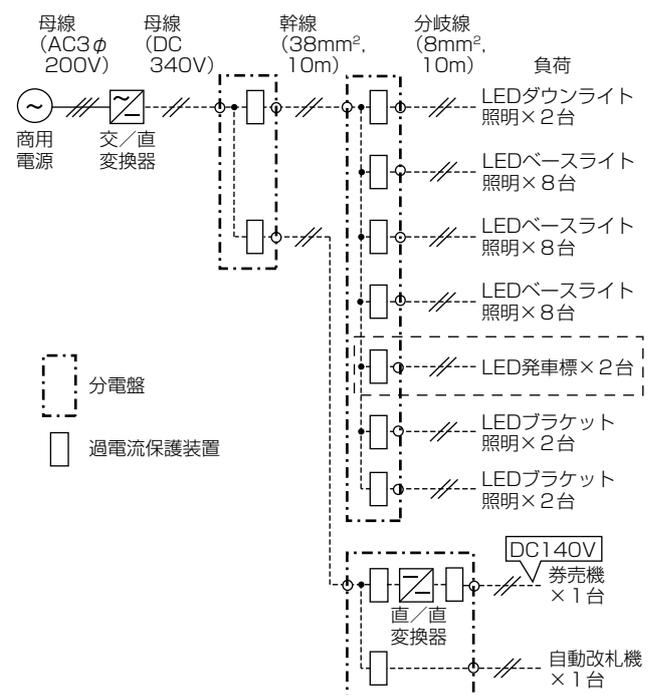


図4. モデル駅の直流配電ブロック図

インピーダンスが小さい)すなわち短絡電流が大きい条件下で検討することで、より安全側の結果を得ることができる。なお、配線抵抗では“日本電線工業会 技資103号A”にのっとるものとする。

- ④ 駅内直流配電システムの導入費用削減を目的とし、LED照明を除く駅電機設備については既存の設備内に使用されている電力変換器を再利用することとする。

(2) 短絡事故のモデル化

短絡事故を次のようにモデル化した。

- ① 短絡事故点(短絡点抵抗 0Ω)を幹線用分電盤の出力部、分岐線用分電盤の入出力部、各駅電機設備の入力部から任意に選択できるものとする。
- ② 各駅電機設備については、各設備内の電力変換器(実機)を対象にそれぞれ所内人工短絡試験を実施し(図5)、得られた電圧/電流波形データから各設備単体の等価回路モデルを作成することにする(図6、図7)。
- ③ 所内人工短絡試験については、対象の電力変換器を無

負荷状態かつ直流340V(券売機だけ直流140V)の充電状態で電源を切り離れた後に短絡したときの線間電圧及び線電流の波形を収集することにする。

- ④ これらの方法で各設備単体の等価回路モデルを作成後、それらを組み合わせてモデル駅の短絡シミュレーションモデルを作成することにする。

2.3.3 短絡保護の設定方法

各分岐線単体での短絡事故時に過電流保護装置へ流れる短絡電流から、次の条件で配線用遮断器及びヒューズを選定した。

(1) 配線用遮断器の選定条件

配線用遮断器については負荷の合計定格電流の1.2倍以上のものを選定することとする。

(2) ヒューズの選定条件

ヒューズについてはカタログにのっとって選定することとする。具体的にはヒューズの劣化に対してサイクル寿命も考慮して(“通電休止の繰り返しで休止時間が十分にある場合”を仮定して負荷率0.7、通電実効値電流=設備定格電流として)、設備定格電流に対して $1.45 (= 1.0/0.7)$ 倍以上

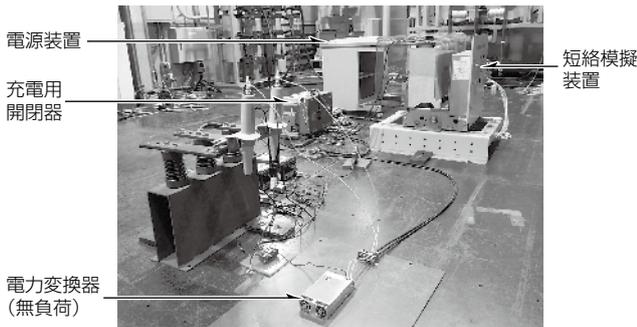


図5. 所内人工短絡試験

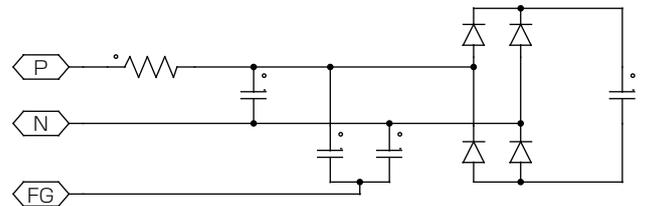
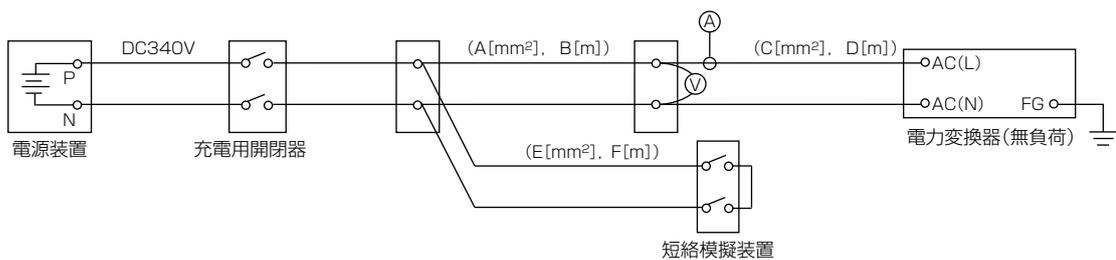
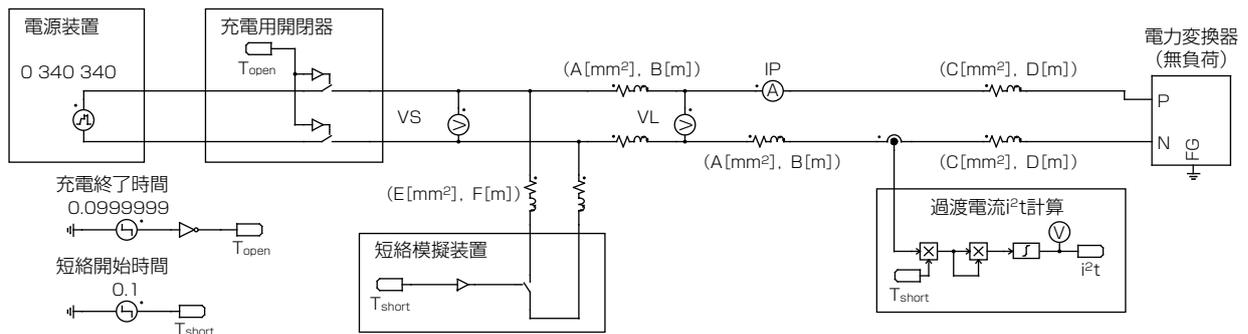


図6. 電力変換器のモデル化の一例



(a) 所内人工短絡試験回路



(b) 短絡シミュレーションモデル

図7. 短絡事故のモデル化の一例

のヒューズ定格電流とするとともに、過渡電流(短絡電流) i^2t がヒューズ溶断 i^2t の50%以下になるように選定することとする。

2.3.4 短絡保護動作の健全性検証

モデル駅の短絡シミュレーションモデルを作成の上、各短絡保護装置を対象に短絡保護を設定(配線用遮断器とヒューズを選定)した後、モデル上で短絡事故を発生させた際に負荷側放電電流によって健全回線の短絡保護装置が誤遮断を招かないことを確認する。

2.4 短絡保護の所内人工短絡試験と短絡シミュレーション結果

2.4.1 短絡シミュレーション波形の精度の確認

モデル駅の一部回路を模擬したもので短絡シミュレーション波形の精度を確認した。一例として、図4の破線内の分岐線(LED発車標×2台)を対象に所内人工短絡試験と短絡シミュレーションの波形を比較した(図8)。 i_{max} と i^2t を比較すると差異が±5%以内の誤差に収まっており、各駅電機設備の等価回路モデルに一定の精度があることを確認できた(表1)ので、この手法で作成した各駅電機設備の等価回路モデルを組み合わせてモデル駅の短絡シミュレーションモデルを構築することにした。

2.4.2 短絡保護動作の健全性の確認

モデル駅の各短絡保護装置を対象に短絡保護を設定(配線用遮断器とヒューズを選定)した(図9)。一例として、分岐線Aa(LEDダウンライト照明回線)の送電端で短絡が発生した場合の健全回線(分岐線Ab:LEDベースライト照明回線)の短絡保護装置での波形を示す(図10)。短絡保護装置で、 i_{max} が240.5Aになって配線用遮断器の動作領域に至らなかったこと、及び過渡電流(放電電流) i^2t が3.23A²sになってヒューズ溶断 i^2t (19.00A²s)に至らなかったことから、負荷側放電電流によって健全回線の短絡保護装置が誤遮断を招かないことを確認できた。

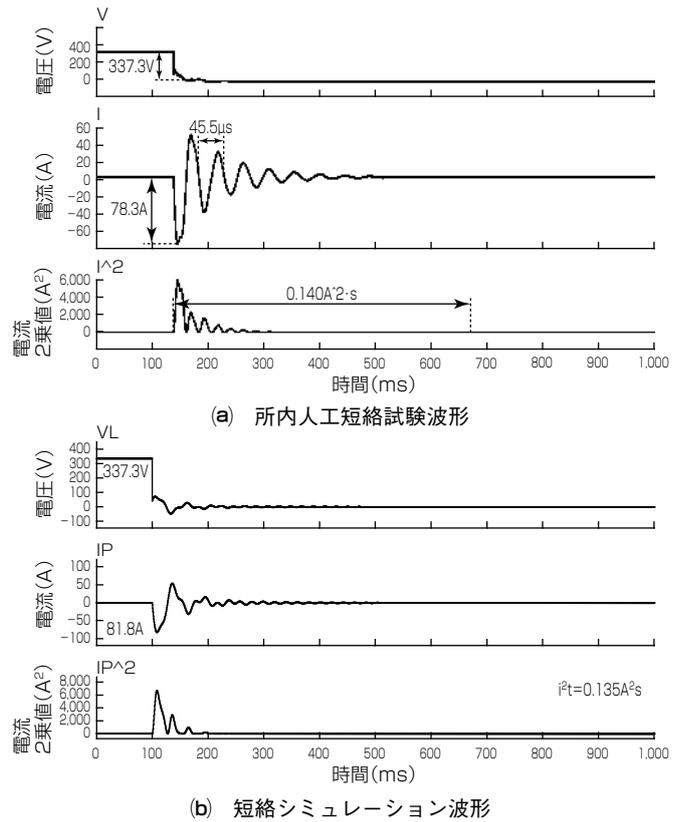


図8. 短絡波形の一例

表1. 所内人工短絡試験波形と短絡シミュレーション波形との比較結果

	i_{max}	i^2t
所内人工短絡試験波形	78.3A(0.0%)	0.140 A ² s(0.0%)
短絡シミュレーション波形	81.8A(+4.5%)	0.135 A ² s(-3.6%)

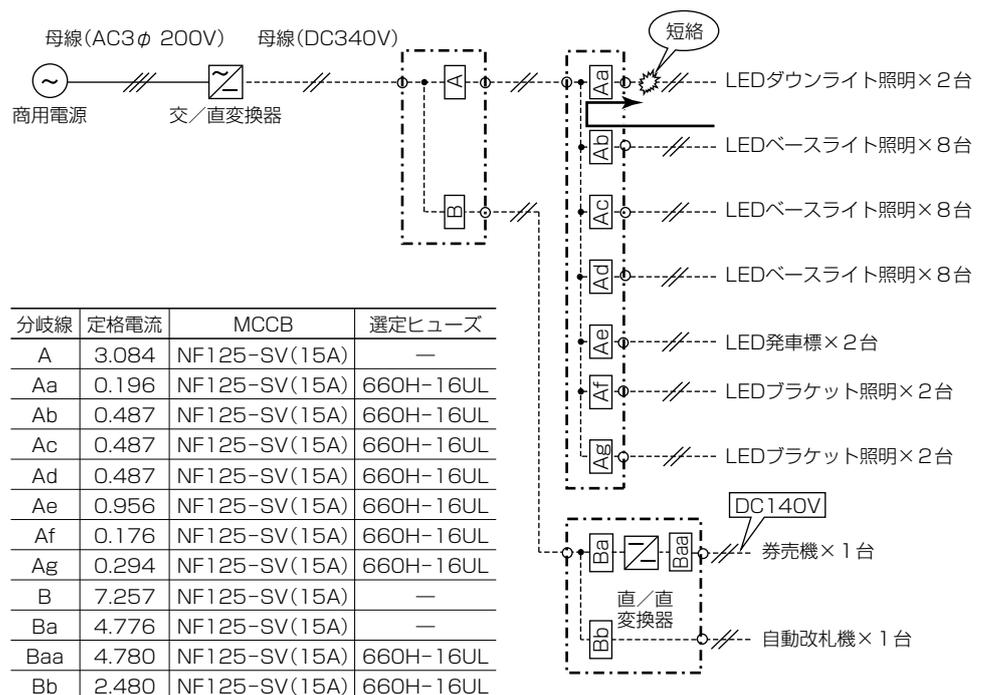


図9. モデル駅の短絡保護設定一覧及び短絡事故点

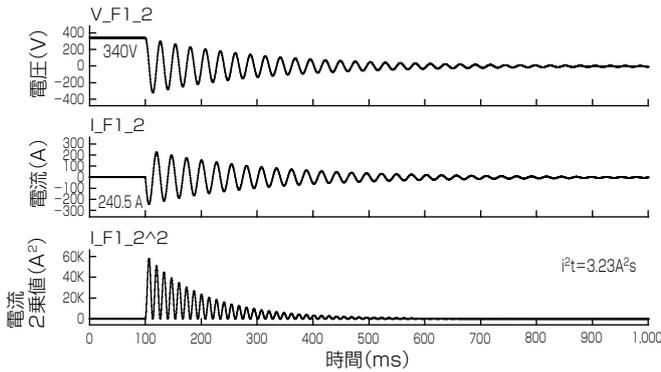


図10. 分岐線Abの短絡保護装置でのシミュレーション波形

3. 地絡保護手法の検討

3.1 直流配電内の地絡事故の検出方法

簡略的に交流電源から負荷までの電力供給フロー(交流電源→交/直変換器→直流母線→幹線用分電盤→幹線→分岐線用分電盤→分岐線→負荷)を示した直流配電ブロック図に地絡保護装置(以下“51G”という。)の配置イメージを反映した(図11)。直流配電内の地絡保護として、幹線用分電盤と分岐線用分電盤に51Gを設置することを想定した。これで幹線と分岐線のP相とN相の電流差を監視して地絡箇所を各線単位で特定可能である(図12)。

3.2 分岐線数の増加による51G動作への懸念事項

ITU-T L.1200にのっとってデータセンターの直流配電で採用されている中性点高抵抗接地を駅内配電に適用した際の地絡回線や健全回線の分岐線数による51G動作への影

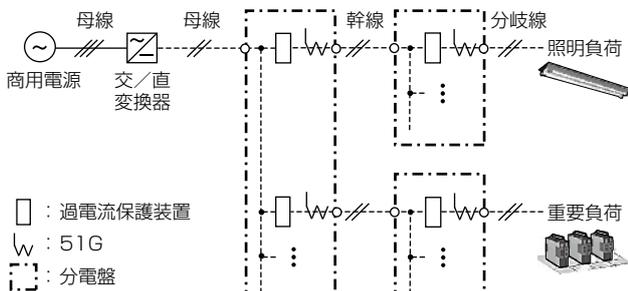


図11. 51Gの配置イメージ

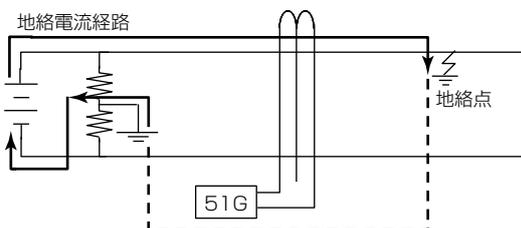


図12. 51Gの検出回路

響について述べる。この接地方式による地絡電流の抑制で感電時の身体的影響を低減できるが、保護装置の検出が困難になるので検出感度を高める必要がある。ここで、P相地絡時の地絡点電流 I_g は中性点接地抵抗 R_e 及び各分岐線の対地絶縁抵抗 R_z を介してN相母線に流れるルートに分かれるので、分岐線ごとのN相母線への吸込み電流を I_{gz} 、地絡回線及び健全回線の分岐線数を m 、 n とおくと、両回線(両幹線)の不平衡電流 I_{g51G} 、 I_{s51G} は次式になる(図13)。

$$I_{g51G} = I_g - I_{gz} * m \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

$$I_{s51G} = I_{gz} * n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

ゆえに、 m が増えると I_{g51G} が減って51Gの検出感度電流より下回ると誤不動作の懸念が、 n が増えると I_{s51G} も増えて51Gの検出感度電流より上回ると誤動作の懸念が考えられる。

3.3 駅内直流配電内での51Gの動作検証

51Gの駅内直流配電への適用の可能性を検証するため、模擬試験回路を構築して、異なる地絡条件の所内人工地絡試験で各保護装置の動作有無を確認した。

3.3.1 検証方法

(1) 保護動作条件

51Gの最小動作時間が400msであるため、幹線：800ms、分岐線：400msに設定して協調を確保することにした。また、地絡電流による感電電流をIEC/TS60479-1 Ed4.1(感電電流と継続時刻の関係)の領域DC-2内に収めることにし、分岐線での感電時間は配線用遮断器の開放時間(20ms)と裕度を見て500msにして I_g の上限を40mAと設定した。ゆえに、地絡電流遮断時間検出51Gの検出感度を最低値の20mAとした。ただし、最大不動作電流は検出感度電流の50%(10mA)である。

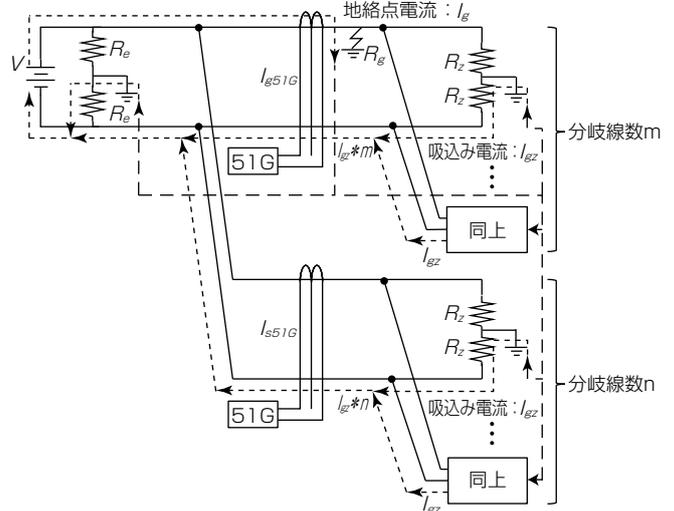


図13. 地絡電流ルート

(2) 所内人工地絡試験

図14の試験回路を対象に地絡回線と健全回線の分岐線数 m , n を変数として、直流母線電圧 V (380V)を印加中にP相模擬地絡(地絡点抵抗 R_g : 1 k Ω)を発生させた際の地絡回線と健全回線の幹線用51G(51G_g, 51G_s)の動作有無を確認することにした。なお、分岐線の対地絶縁抵抗については、直流母線のP相~アース間とアース~N相間に分岐線の合成対地絶縁抵抗 R_{zg} , R_{zs} を挿入して模擬した。ここで、地絡事故時での全分岐線数 x (この試験では $m+n$)の等価回路を考えると、P相とN相の合成抵抗 Z_p , Z_n 及び I_{gz} , I_g は次式になる(図15)。

$$Z_p = (1/R_e + x/R_z + 1/R_g)^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

$$Z_n = (1/R_e + x/R_z)^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

$$I_{gz} = Z_n / (Z_p + Z_n) * V / R_z \dots\dots\dots (5)$$

$$I_g = Z_p / (Z_p + Z_n) * V / R_z \dots\dots\dots (6)$$

式(1)~式(6)から I_{g51G} , I_{s51G} の理論値を導出することにした。

3.3.2 検証結果

m , n を変化させた場合の51Gの動作有無結果の一例を表2に示す。51G_gは $m=0$, 16のときに動作したが、 $m=27$ のときに誤不動作した。これは、地絡回線の I_{gz} が I_g を打ち消して I_{g51G} が51G検出感度を下回ったためと考えら

れる。また、51G_sは $n=0$, 11のときに不動作であったが、 $n=27$ のときに誤動作した。これは、健全回線の I_{gz} が51G検出感度を上回ったためと考えられる。

3.4 駅内直流配電の地絡保護の安全性・安定性向上

3.3節から、51Gは地絡回線の分岐線数が多いと誤不動作し、健全回線の分岐線数が多いと誤動作することを確認した。駅内直流配電(V : 340V, R_e : 33k Ω)を想定すると、感電電流 I_g が最大かつ I_{s51G} が最大になる最悪条件(R_g : 0 Ω , R_z : 400k Ω (電気設備技術基準の許容対地絶縁抵抗))でも感電電流が領域DC-2内にあり($I_g < 40$ mA)かつ51Gが誤動作しない($I_{s51G} < 10$ mA)条件は、式(1)~式(6)から $x < 35$ かつ $n < 12$ (1幹線当たりの最大分岐線数は10)になる。

4. むすび

駅内配電システムの直流化によって、駅で“電源の信頼性向上”“設備の簡素化”“省エネルギー”の効果が期待されると考え、駅内直流配電システムの開発を進めている。本稿ではこの開発の課題の一つである“直流配電内の短絡/地絡保護協調の確立”に向けて、短絡保護の三つの問題点のうち“充電状態の負荷内部コンデンサ容量や寄生容量に起因した放電電流による健全回線の配線用遮断器やヒューズの誤遮断”について検討した。具体的には、駅電機設備の電力変換器を用いた所内人工短絡試験で収集した電圧/電流波形データを基に短絡シミュレーションを確立した。また、これを活用して小規模モデル駅の照明負荷や重要負荷を対象に設定した短絡保護装置(配線用遮断器及びヒューズ)が誤遮断を招かないことを確認し、実機への設定方法の適用について可能性を示唆した。

また、本稿では課題の一つである“電源の信頼性向上”に向けて51Gを用いた地絡保護を検証した。この結果、51Gは地絡回線の分岐線数が多いと誤不動作し、健全回線の分岐線数が多いと誤動作する可能性があることを確認した。また、これらの発生を防ぐ最大分岐線数の算出法を導出し、適当な分岐線数の設定によって、51Gの駅内直流配電への適用の可能性を示した。ただし、最悪条件での導出のため、駅の特情に応じて分岐線数を決定することが望ましい。今後、動力負荷の短絡保護検討や、51G以外の地絡保護手法の確立等を進める予定である。

参考文献

- (1) 竹内勇人, ほか: 中低圧直流配電システムの取組み—駅舎直流配電の省エネルギー効果—, 第56回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 603 (2019)
- (2) 藪田洋平, ほか: 駅内直流配電の短絡保護に関する一考察, 2019年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 5~41 (2019)
- (3) 藪田洋平, ほか: 駅内直流配電における地絡保護装置の動作検証, 令和2年電気学会全国大会講演論文集, 5~186 (2020)

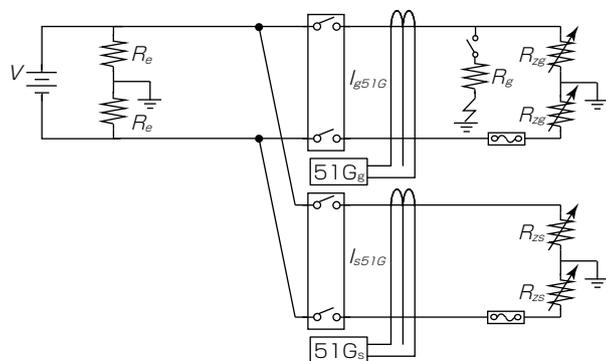
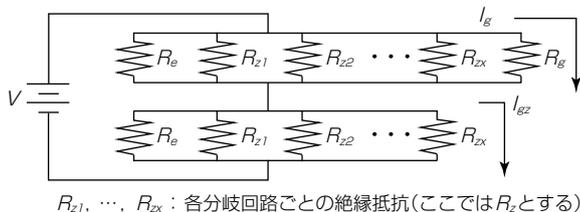


図14. 人工地絡試験回路



R_{z1}, \dots, R_{zx} : 各分岐回路ごとの絶縁抵抗(ここでは R_z とする)

図15. 地絡事故時での全分岐線数 x の等価回路

表2. 所内人工地絡試験結果の一例

分岐線数		地絡電流 I_{51G}		検出器動作	
地絡回線	健全回線	地絡回線	健全回線	地絡回線	健全回線
0	27	31.1mA	23.6mA	動作	誤動作
16	11	17.1mA	9.6mA	動作	不動作
27	0	7.5mA	0.0mA	誤不動作	不動作