

気中絶縁形中性点接地抵抗器の開発

Development of Air Insulated Neutral Grounding Resistor

吉田 覚^{※1}
Satoru Yoshida
後藤 直樹^{※1}
Naoki Goto

1 はじめに

我国の送電系統は、地絡時の異常電圧の抑制と保護装置の確実な動作を目的に、抵抗接地方式が採用されている。

三相の中性点を接地するため、使用する抵抗は中性点接地抵抗器（以下NGRという）と言われている。

66～77 kVの送電系統に従来使用されている気中絶縁形NGR（以下気中NGR）は、充電部が密閉されておらず充電部保護柵が必要なことから、据付面積が大きくなってしまいう問題がある。このため、充電部の密閉化と、それによる据付面積の縮小が求められている。

この要求に応えるために、各社よりガス絶縁形、油絶縁形等のNGRが開発されコンパクト化が実現したが、一方で高コストという問題が発生し、ユーザ要求に十分応えているとは言えないのが実情である。

そこで、当社は低コスト、コンパクト化を両立させた77 kV送電系統用のNGRの開発に取組み、この度、試作機を製作完了し、形式試験一式を実施したので以下にその概要を報告する。

2 開発の方向性

低コスト、充電部の密閉化、コンパクト性の実現を新形気中NGRの開発コンセプトとし、次の方向性を定めた。

2.1 開発の基本方針

(1) 気中絶縁方式

従来のガス絶縁形NGRでの低コスト化には限界があるため、今回は低コスト化の可能な気中絶縁方式を採用する。

(2) 充電部の密閉化

66～77 kVの送電系統に従来使用されている気中NGRは高圧充電部が露出しているため安全性に問題があり、また、充電部保護柵が必要なことから、据付面積が大きくなってしまいう問題があった。これを解決するために、気中絶縁でありながら充電部を密閉化した構造のNGRの開発を目指す。

(3) 小形化

従来の気中NGRは鋳鉄製の抵抗体を使用しており、最高使用温度の制限から小形化に限界があった。今回は、ガスNGRでも用いられているステンレス鋼を材料とした抵

抗体を採用することにより小形化を図る。

(4) 低コスト化

上記(1)～(3)の基本方針は低コスト化に直結する。更に仕様設定、設計、製作、試験の各工程においても低コスト化の施策を実行する。

2.2 検討事項と開発事項

上記開発の基本方針を実現するために、下記の検討と開発を行うこととした。

(1) 検討事項

①適用規格の検討

現在のNGRは国内の電力用規格に従って製作されているが、海外規格との比較により、適正な仕様を検討しユーザに提案する。

(2) 開発事項

①抵抗体の開発

低コスト化、小形化を目指すため、抵抗体を新開発する。

②ブッシングの開発

今回開発するNGRは、気中絶縁で充電部密閉構造となるため、中性点端子は対地絶縁に耐える気中ブッシングを使用しなければならない。しかし、市場に適当なブッシングが見当たらないため今回は、新たに気中ブッシングを開発する。

③ケースの新設計

充電部密閉形の気中絶縁というコンセプトによるNGRを開発するために、新しい考え方によるケースの設計が必要である。

④耐震性能の振動解析

本開発品に続く種々の仕様による気中NGRに関して、設計、試験の省力化のため、耐震性能の動的応答解析技術の確立を目指す。

3 適用規格と仕様設定

適用規格を検討し、ユーザ（電力会社殿）に提案した結果、ご理解を得たので、それに基づき今回の開発品の仕様設定を行った。

※1 電力事業部 変圧器設計G

3.1 適用規格の比較検討

新 NGR の開発に大きな影響を与える性能項目につき、国内の電力用規格 B-0110⁽¹⁾と、国際的な標準である米国電気電子学会規格 IEEE-32⁽²⁾とを比較検討し、抵抗体の温度上昇限度と耐電圧値については IEEE-32 に準じて仕様設定することとした。

(1) 抵抗体温度上昇限度

温度上昇限度の規格値の比較を表1に示す。B-0110では、気中絶縁で抵抗体材質がステンレス鋼の場合には温度上昇限度の規定がない。一方、IEEE-32では抵抗体材質がステンレス鋼の場合には760℃の値である。この値を適用すれば、抵抗材料の使用量を低減し、かつ、抵抗体の小形化が図られる。そこで、新 NGR の温度上昇限度は760℃を適用することにする。

(2) 耐電圧

① 定格電圧

NGRはその名称通り片側が接地され、高圧側は3相系統の中性点に接地されるので、通常は数百V程度の電圧しか印加されていない。地絡事故時には事故発生から遮断器が動作して系統が遮断されるまでの数秒間という短い時間に主回路の $1/\sqrt{3}$ の電圧が印加されるのみである。このことから、NGRの定格は短時間定格とされ、定格電圧も系統電圧の $1/\sqrt{3}$ の値とされている。

しかし、電力用規格 B-0110 では耐電圧値は NGR の定格電圧ではなく、主回路の公称電圧に対応した耐電圧値が規定されている。

耐電圧値についての B-0110 と IEEE-32 の比較を表2に示す。IEEE-32では雷インパルス耐電圧値(LI)は規定されておらず、また、商用周波耐電圧(AC耐電圧)も定格電圧に対応した値となっている。

② 雷インパルス耐電圧

77 kV 系統 NGR の雷インパルス耐電圧値は、定格電圧が $77\text{ kV}/\sqrt{3} = 44.5\text{ kV}$ となるため、表2の B-0110 に示す主回路の公称電圧 33 kV に対する LI 200 kV と、77 kV に対する LI 400 kV から比例換算して LI 250 kV と設定した。

表1 温度上昇限度の比較

規格	抵抗体材質	温度上昇限度 ℃	備考
B-0110	気 鋳鉄	350	絶縁物の許容温度より
	中 上記以外	協議による	—
	ガス中 ステンレス鋼	410	SF ₆ ガスの許容温度(熱分解ガス発生限度)
IEEE-32	鋳鉄	510	—
	ステンレス鋼	760	—

③ 商用周波耐電圧

NGR の実運転状態では前述のように非常に短時間のみの電圧印加であり、また、接地側端子は恒久的に接地されていることから、商用周波耐電圧値は低減することとした。

B-0110では、一線地絡時の中性点電位(常規対地電圧)に安全係数1.5を乗じる考え方が述べられている。

今回開発した77 kV 系統用 NGR の AC 耐電圧は、これに従って70 kV とした。

3.2 仕様設定

前記の検討とユーザとの調整の結果、今回開発品の仕様を、表3に示すように設定した。この基本仕様は中部電力殿の形式に設定され、これに基づき形式試験品を開発、設計、製作した。

表2 耐電圧値の比較

B-0110			
主回路の公称電圧 kV	定格電圧 kV	雷インパルス耐電圧 kV	商用周波耐電圧 kV
33	$33/\sqrt{3}$	150	70
		170	
		200	
66	$66/\sqrt{3}$	350	140
77	$77/\sqrt{3}$	400	160

IEEE-32	
定格電圧 kV	商用周波耐電圧 kV
25	60
34.5	80

表3 気中 NGR の仕様、諸元

項目	仕様、諸元
定格電圧	$77/\sqrt{3}\text{ kV}$
定格電流	400 A
抵抗値	111 Ω
定格通電時間	15 秒
抵抗体温度上昇	760 ℃
耐電圧	LI 250 kV AC 70 kV
寸法	4020×2020×3680mm
質量	3400 kg

4 開発と設計・製作

4.1 開発

(1) 抵抗体の開発

今回、気中 NGR 用に新たにステンレスを材料とした小形、低コストの抵抗体を開発した。抵抗体は多数を積上げて NGR を構成するようにした。

①構造

抵抗体は支持碍子で絶縁するユニット式とし、上下間で抵抗体を連結できる構造とした。抵抗体の構造写真を図1に示す。

②耐熱性、耐食性

気中 NGR の場合、抵抗体は空气中で高温にさらされることから、今回開発した NGR で使用する抵抗材料の耐熱性と耐食性について試験を行った。なお、調査は新日本製鐵株式会社技術開発部光研究所殿に依頼した。

耐熱性は、抵抗体の温度上昇限度（760℃）までの通電が NGR の寿命期間中に360回（1回/月×12×30年）発生すると仮定し、常温から800℃までの繰返し加熱による各特性の変化を確認した。その結果、外観、酸化量、機械的強度、抵抗値の各変化ともわずかであり問題のないことが確認できた。図2に加熱サイクルによる抵抗値の変化を示す。

耐食性は孔食電位試験（JIS G0577）、塩水噴霧試験（JIS Z2371）の JIS 規格に準じて試験を行い、耐孔食性および腐食後の抵抗値の変化、機械的強度とも問題の無いことを確認した。



図1 抵抗体

(2) 気中ブッシングの開発

新 NGR 用に、小形で低コストの気中ブッシングを開発した。

①構造

通常 LI 250 kV クラスのブッシングはコンデンサタイプが用いられるが、今回のような高温で発熱する抵抗体の影響を受ける用途には使用できない。このため、絶縁物が磁器のみで構成される単一形ブッシングをブッシングメーカーと共同で開発した。開発した気中ブッシングの外観を図3に示す。

②仕様、試験

ブッシングの基本仕様は NGR の仕様に従った。ブッシングの性能評価のための試験項目は、JEC 等の規格に準じ

て定めた。

その試験項目を表4に示す。これにより試験を実施し、すべての試験項目に合格した。

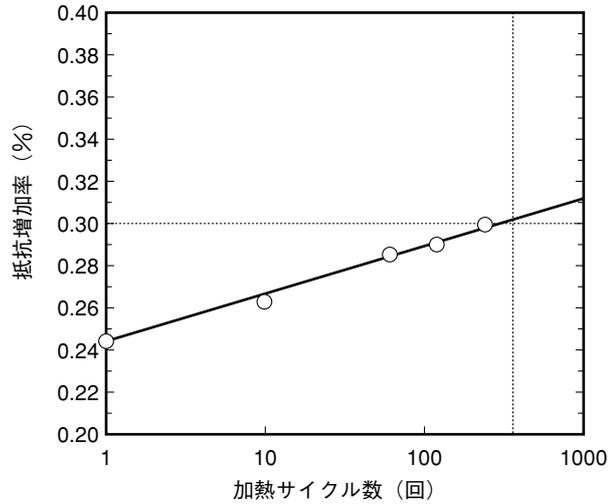


図2 加熱サイクルによる抵抗値の変化

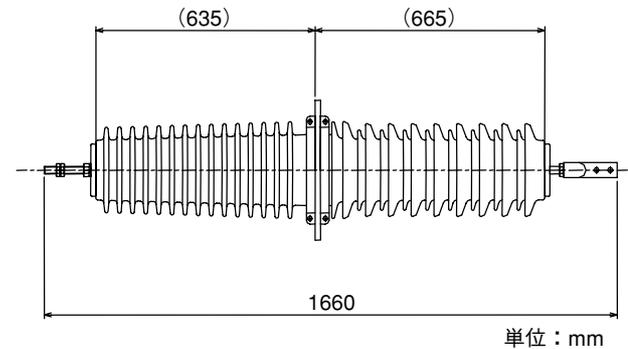


図3 気中ブッシングの外観

表4 NGR用ブッシング試験項目

参考規格	項目	内容等
JEC-183	外観検査	JIS C3802による
	寸法検査	図面と比較
	絶縁抵抗試験	中心導体と支持金具間
	商用周波 乾燥耐電圧試験	70 kV 1分間
	商用周波 注水耐電圧試験	70 kV 1分間
	雷インパルス 乾燥耐電圧試験	±250 kV 各5回
	雷インパルス 注水耐電圧試験	±250 kV 各5回
	温度上昇試験	定格電流 600 A
JIS C3801	加熱試験	炉内にて 250℃ まで加熱
	過電流試験	定格過電流にて検討（計算）
	耐荷重試験	曲げ耐荷重試験
	冷熱試験	碍管を熱湯と冷水に浸せき
参考試験	吸湿試験	吸湿試験装置にて実施
	人工汚損交流電圧試験 部分放電試験	等価霧中法 部分放電開始電圧の確認

4.2 構造設計

(1) 気中NGRの構造

今回開発した気中NGRは、支持碍子で大地と絶縁された抵抗体を、ケース内に収納する構造である。これにより充電部が密閉化され、据付面積の縮小を図る。ケースには吸気、換気口があり、冷却は外気を取り入れる方式とする。

また、NGRが定格通電された場合の熱保護策として、人が触れる恐れのあるケース壁面に保護網を取付ける構造とした。その構造図を図4に示す。

(2) ケース

抵抗体を収納するケースは、外気を取り入れる方式であることから、内圧に耐える強度や気密性が必要なく、簡素化しコストダウンを図っている。ただし、抵抗体を収納したまま吊上げが可能な強度を有している。

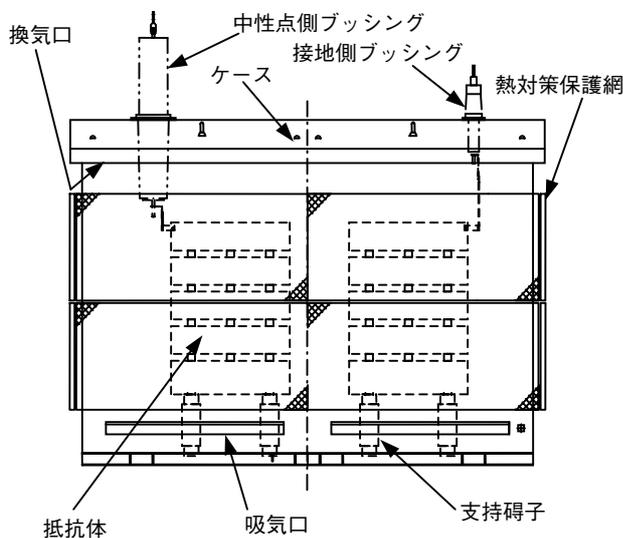


図4 構造図

4.3 製作

(1) 組立

ケース上面カバーを取外し、上部よりユニット化した抵抗体を容易に収納できる構造とするなどの工夫により、短時間で組立て可能になった。

また、上面カバー取付後は、抵抗体を収納したまま吊上げ、移動が可能であり、現地据付が容易になった。

(2) 輸送

ケース寸法を縮小したため、ブッシングを取外してトラック輸送が可能となり、輸送コストを抑制できるようになった。

(3) 完成外観

完成した気中NGRの外観写真を図5に示す。



図5 気中NGR (77/√3kV、400A品)

5 試験

5.1 試験項目

新NGRの試験項目をユーザと協議の上、表5に示す通りに決定した。今回の試作機の試験は形式試験項目について実施し、すべての項目に合格した。試験項目の中で、温度上昇試験は通常とは少し違った試験方法を採用している。また、耐震試験については動的応答解析を実施したので、この2項目について以下に概要を報告する。

表5 気中NGR 試験項目一覧

試験項目	内容等	形式試験	受入試験
構造点検	一般構造	○	○
抵抗測定	全体抵抗測定 ±5%以内	○	○
絶縁抵抗測定	1000Vメガー	○	○
温度上昇試験	等価通電試験 (全体)	○	—
	定格電流通電試験 (縮小モデル)	○	—
	常時零相通電試験 (参考試験)	○	—
商用周波 耐電圧試験	乾燥状態	○	○
雷インパルス 耐電圧試験	乾燥状態	○	—
耐震試験 (参考試験)	抵抗体のみ 0.3G共振正弦3波	○	—

5.2 温度上昇試験

温度上昇試験として次の3項目について実施した。

(1) 等価通電試験 (全体)

開発品の定格通電容量は約 18 MW にもなるため、定格電流を定格時間通電する温度上昇試験は、設備制約上困難である。このため、可能な限りの大電流を流し通電時間を延長して、NGR に供給するエネルギーを同量とする等価通電試験を実施した。通電時間は 167 秒と短時間であるので、通電中の冷却の影響は少ないと考えられる。等価通電試験結果を表 6 に示す。

(2) 定格電流通電試験 (縮小モデル)

抵抗の断面積を同じにした縮小モデル (1/2 ユニット相当) に定格電流を通電し抵抗体の温度上昇を測定した。その結果を表 7 に示す。定格電流による抵抗体の温度上昇限度に対して余裕のある値となっている。

(3) 常時零相通電試験 (参考試験)

中性点には系統の不均衡により常時零相電圧が生じ、NGR には常時わずかな電流 (常時零相電流) が流れており、この電流が温度上昇に影響を与える場合がある。そのため、常時零相電流の上限値を 5 A と定めて温度上昇試験を実施した。

その結果を表 8 に示す。問題のある温度上昇箇所はないことが確認できた。

表 6 等価通電試験 (全体) 結果

試験条件：通電電流 120 A、通電時間 167 秒

部 位	温度上昇 ℃	温度上昇限度 ℃
ケース (壁面)	131.5	—
ケース (カバー)	154.3	—
保護網	14.3	40
抵抗体	460.6	760

表 7 定格電流通電試験 (縮小モデル) 結果

試験条件：通電電流 400 A、通電時間 15 秒

	温度上昇 ℃	温度上昇限度 ℃
抵抗体	550.5	760

表 8 常時零相通電試験結果 (参考試験)

試験条件：印加電圧 555 V時 5 A

部 位	温度上昇 ℃
ケース (壁面)	10.2
ケース (カバー)	10.7
保護網	1.7
抵抗体	13.9

5.3 耐震試験

(1) 耐震試験

NGR の耐震性能は水平加速度 0.3 G 共振正弦 3 波に耐えることが要求される。その確認のため、あらかじめ NGR の応答加速度周波数特性を測定して共振周波数を求め、その周波数の正弦 3 波で NGR を加振して耐震性能を確認する。

なお、試験は電力中央研究所殿にて実施した。図 6 に試験風景を示す。裕度確認のため、規定の 1.2 倍の加速度 0.36 G まで共振正弦 3 波加振を実施し、各部に異常のないこと、支持碍子の応力も破壊強度以下となる良好な結果を得た。



図 6 NGR 耐震試験風景

(2) 動的応答解析

本試作機の耐震性能は耐震試験で確認したが、異なった仕様品については、再度ユーザより耐震性能の要求が出ると考えられる。しかし、その都度の耐震試験実施は、低コスト化の大きな阻害要因となる。このため、振動解析で耐震性能が確認できるように実測結果と解析結果の比較を行った。

① 応答加速度周波数特性

共振周波数を求めるための応答加速度周波数特性の解析を行った。この解析は、加振台の入力加速度に対する抵抗体の各段の応答加速度の周波数特性を求めるものである。

実測結果との比較を図 7 に示す。これより、応答加速度周波数特性の解析で十分な精度が得られることが確認できた。

② 共振正弦 3 波特性

共振周波数の 3 波を加振する共振正弦 3 波特性も実測結果と解析結果の比較を行った。この解析では、抵抗体各段の加速度の応答倍率と、各段の支持碍子の応力 (加振中の最大応力) を求めた。その結果を図 8 に示す。なお、図 8 において、加振加速度の波高値と各段位の応答加速度の波

高値の比を応答倍率として表している。

これより、共振正弦3波特性も実測と解析での整合性が確認できた。

(3) 耐震試験のまとめ

以上の結果より、今回の試作機と類似構造の製品であれば今後の新しい仕様品は解析により耐震性能が確認でき、実測試験の省力化が可能となる。

6 まとめ

近年の中性点接地抵抗器に要求されていた、充電部の密閉化され、安価な気中絶縁形 NGR の製品化ができた。

これにより、据付面積の縮小が図れ設置面積に制約のある変電所へも設置可能となった。また、従来の気中絶縁形 NGR の更新用としての採用も期待できる。

参考文献

- (1) 電気事業連合会：「中性点接地抵抗器」電力用規格 B-0110 (2001)
- (2) 米国電気電子学会：「Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices」米国電気電子学会規格 IEEE Std-32 (1972)

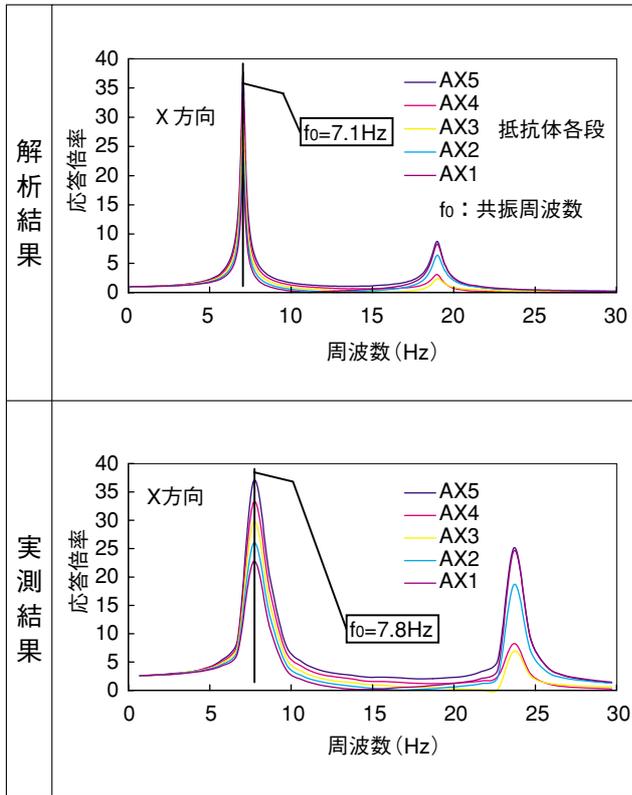


図7 応答加速度周波数特性の解析と実測の結果比較

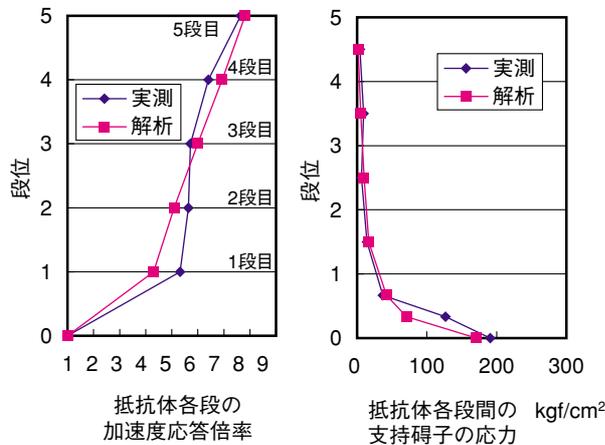


図8 共振正弦3波加振特性の解析と実測の結果比較