

直流電気鉄道における 電力系統信頼度の研究



関島 志郎*



安藤 政人**



中島 等***

電気鉄道の電力供給設備としては送電設備、変電設備、電車線路設備などがあるが、これらに対してこれまで多くの信頼度向上施策がとられてきた。ただ、これらの信頼度向上の施策は主に経験則により実施され事故や障害件数の削減に効果をあげているものの、その施策の投資効果をシステム全体の信頼度の面から客観的に評価することは、その手法が確立されていないこともあり行われていない。

本研究では東京大学との共同研究により、電鉄特有の設備である直流き電系統の信頼度を導き出す一つの手法として、変電所からの供給可能電力確率とそのときに負荷が必要としている電力量から、供給不足となる電力量とその確率を算出するという、直流き電系統の信頼度を判定する一つの手法を導き出した。

●キーワード：直流電気鉄道、信頼度、き電系統、電力供給

1. はじめに

電気鉄道における電力ネットワークは電気車へ電力を供給する「き電系統」、信号や駅に電力を供給する「配電系統」、変電所の電源となる「送電系統」によって構成されている。

これらの系統に対しては過去の事故の経験から多くの信頼度向上施策がとられているが、これらの施策は経験則により実施されており事故や障害件数の削減に効果を上げているものの、その投資効果をシステム全体の信頼度の面から客観的に評価することは、その手法が確立されていないこともあり行われていない。

これまで、このような電力系統の信頼度を客観的に評価する手法の研究については、大学や電力事業者によって、主に電力事業者の送電線を対象に行われてきた。

そこで本研究ではこの手法を応用して、電鉄特有の設備である直流き電系統の系統信頼度を定量的に算出し、信頼度を判定する手法を確立することを目的とした。

を取り付けることなどによる故障が発生する時期であり、時間と共に故障率は低下する。中期故障期は故障率の時間変化が見られず純粋に確率的に故障が発生する期間である。また一般的に故障率が全期間を通じて最も低くなる。終期故障期は機器が老朽化して徐々に故障率が上昇する期間である。時間に対する故障率の変化を模式的に示すと図1のようになる。

この曲線が洋式の風呂桶の形に似ていることからバスタブ曲線（Bath Tub Curve）と呼ばれている。本研究ではバスタブ曲線の中期故障期のみを考慮することとし、時間と共に故障率は変化しないと仮定した定常解析を行った。

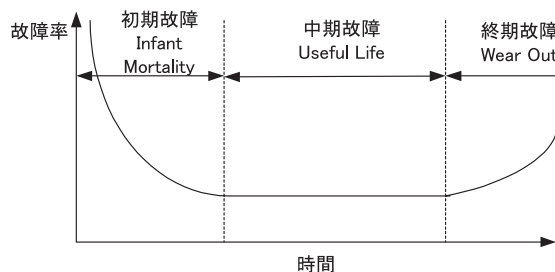


図1 バスタブ曲線

2. 信頼度解析手法

2.1 バスタブ曲線

一般的に機器の故障率は時間と共に変化するとわれ、大きく初期故障期、中期故障期、終期故障期に分類される。

初期故障期は製造過程や定期検査の過程で誤った部品

2.2 構成要素の故障確率

本研究では直流き電系統を構成する各機器の故障確率を用いて信頼度の解析を行ったため、ここではその考え方について説明をする。

変電所機器などの系統を構成している機器の1つをとっ

て、その運転状態を記録すると図2のようになる。

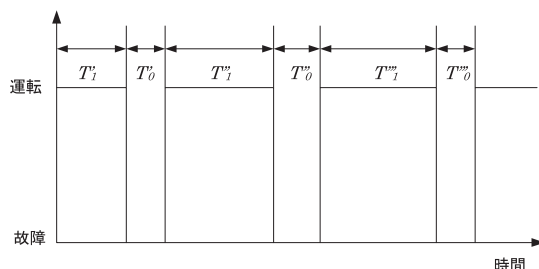


図2 機器の運転記録

図2で T_0 、 T_0' …となっているのは原因のいかんを問わず、事故や故障を起こして十分な機能を果たしていない時期を表している。逆に、 T_1 、 T_1' …は満足にその機能を果たしている時期である。これらの記録を長い間集めれば、事故持続時間 T_0 、運転持続時間 T_1 はある一定の平均値を得ることができる。それらの平均値をそれぞれ、 T_0 （平均事故持続時間）、 T_1 （平均運転持続時間）とすれば $T_0 + T_1$ は一つの事故が起きてから次の事故が起きるまでの平均間隔であり、平均事故発生間隔（MTBF）と呼ばれている。これらを用いて次のことが定義できる。

$$\lambda = \frac{1}{T_1} \dots \text{故障発生率(failure rate)} \quad (1)$$

λ は時間 T_1 経過すると平均して1回事故が起きる事を意味する。ここでは λ は定数と考え、十分長い時間における平均的な故障確率を扱うものとする。

各機器の故障確率 r （単位時間あたりに機器が故障していると考えられる時間に相当）は、機器の平均運転持続時間と平均故障持続時間より式(2)を用いて算出可能である。これによると、例えば故障確率が 1.0×10^{-5} である場合、10年間運転して合計で約53分間運転を停止することになる。

$$\text{故障確率 } r = \frac{\overline{T_0}}{\overline{T_1} + \overline{T_0}} \begin{cases} \overline{T_1}: \text{平均運転継続時間} \\ \overline{T_0}: \text{平均故障継続時間} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)からも分かる通り、故障確率を低減させるためには以下に示す2つのアプローチがある。

1. 平均運転持続時間を長くする
2. 平均故障持続時間を短くする

平均運転持続時間を長くするためには機器を高信頼性のものに置き換えることなどが対策として挙げられる。平均故障持続時間を短くするためには機器が故障してもすぐにその部分を切り離し、バイパスさせるなどの対策が考えられる。

2.3 対象システムのモデル化

対象システムをモデル化するには単線結線図のようなフロー図を描く手法が一般的に良く用いられている。このフロー図は対象システムの構成機器がシステムの信頼性に対して、どのような関係を持つかを示しており、単純に電力機器の単線結線図をそのまま信頼性の関係を示すフロー図として利用することは出来ない。逆に直列に接続されている機器は信頼性を解析する際には1つの要素と見なすことが可能であり、単線結線図より簡略化される場合もある。図3を例にこれを説明する。

図3(a)は遮断器の手前に避雷器が設置されている場合の単線結線図である。一見すると遮断器と避雷器は並列に接続されているので信頼性評価に際してもこれらの機器の関係について並列で表されるように見える。しかし、避雷器が地絡故障を起こすと遮断器側に電力の供給が出来ないため、信頼性を評価する上ではこれらの機器は直列に接続されていることと等価になる。従って信頼性を評価するための構成要素間の関係は図3(b)に示す通りとなる。図中 P_A 、 P_B は避雷器と遮断器の許容通過電力、 r_A 、 r_B は故障確率を示している。

ただし、避雷器の故障には地絡故障を起こす場合の他に、全く電流を流さなくなってしまう場合なども考えられる。そのような場合、落雷時には影響が生じるが、定常時については電力供給に対しては全く影響を与えないので、ここでは地絡故障のみを考えることにする。

また、避雷器には直接電力が通過しないが、ここでは避雷器を接続している母線の許容容量を避雷器の許容容量として定義することにする。

さて、避雷器と遮断器は信頼性を評価する際には直列に接続されていることとなるが、要素が直列に接続され

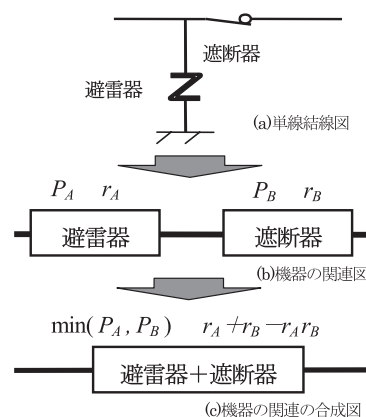


図3 モデル化の例

3. 直流き電システムの信頼度解析

3.1 信頼度評価手法

本研究の直流き電システムの信頼度解析では、各変電所機器などの故障確率およびある複線区間の変電所の各回線の実測負荷データ（図6）を使用して解析を行った。

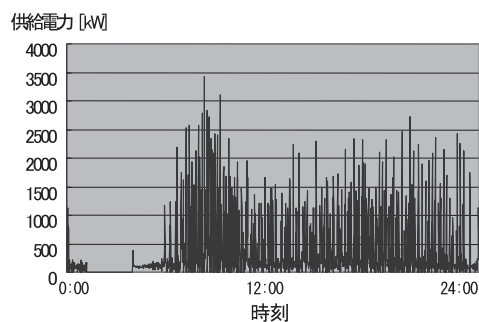


図6 き電回線負荷変動（A方面下りFT2）

以下に信頼度解析の手順を示す。

- (1) 図5に示した各変電所から各直流母線（DB）に供給可能な電力量とその確率を求める。
- (2) 図5に示す各直流母線に接続されているき電部（DD）の故障パターン及び、各き電回線の故障パターンを処理して、隣接変電所を含む3つの変電所から各き電回線へ供給可能な電力量及びその確率を求める。
- (3) 一方、変電所実測データより各き電回線で必要としている電力量の1分毎の値を24時間分算出する。
- (4) (3)で算出した1分毎の各き電回線の必要電力量と(2)で算出した各き電回線へ供給可能な電力量とその確率とを比較して、1分毎の不足電力量とその確率を求める。
- (5) (4)の解析を1440通り（24時間）行い、一日あたりの不足電力量及びその確率を求める。

ここで、以下に本解析で考慮した前提条件を述べる。

- (1) 図5に示すFT1、FT2、FM1、FM2の計4本のき電線への電力供給のみを考える。また、電力が隣接き電区間に供給されることはなく、ASSからFM1、FM2へ、CSSからFT1、FT2への電力供給はないものとする。この3変電所以外からの電力供給は一切ないものとする。
- (2) 隣接の変電所であるASS及びCSSからの最大供給電力はその変電所容量の半分とする。
- (3) 各直流母線（DB）まで供給された電力は、それぞれ接続されている4台のDDを通して各き電回線へと送

られるものとする。直流高速度遮断器が故障した場合には予備器に切り替わり、仮に同時に2台故障した場合にはその時刻に負荷の大きい回線へ優先的に切り替わることとした。

3.2 信頼度解析結果

これまで述べてきた信頼度解析手法を用いて、不足電力量ごとの発生確率を算出し、機器の故障確率を10分の1に向上、10倍に低下させた場合に供給支障確率がどのように変化するか解析を行った。

まず、供給支障が発生する確率を算出した結果、一日の中で供給不足が発生する確率とその不足電力量をグラフにしたものが図7である。これより、不足電力量が増加するにしたがってそれが発生する確率も低下しており、不足電力が発生する確率を合計するとおよそ 2.34×10^{-8} であり、これを時間に直すと25年間で約18.5秒の電力供給不足が発生するということになる。

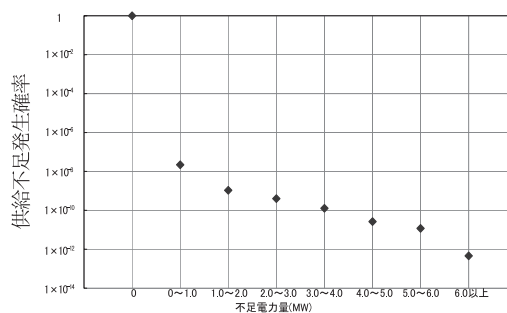


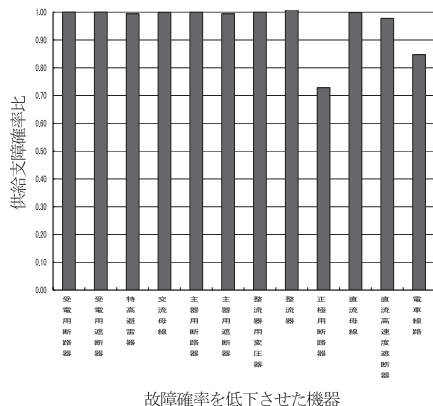
図7 不足電力量とその発生確率

次に、これを基準として各機器の故障確率を1/10および10倍にして解析を行い、基準とした場合の供給支障確率に対して各機器の故障確率を変化させたときの供給支障確率の比を算出した。

まず、各機器の故障確率を10分の1に改善した場合に、供給支障確率がどの程度改善されたかを示したものが図8である。この結果から、正極用遮断器の信頼度向上が供給不足発生確率の低下に大きく寄与していることがわかる。

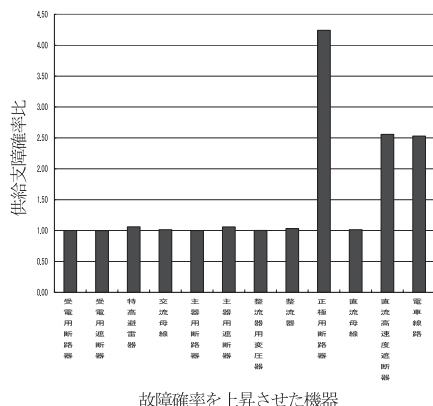
また、各機器の故障確率を10倍にした場合に基準とした供給不足発生確率に対し、どの程度悪化したかを示したものが図9である。この結果から、正極用遮断器の故障率上昇の影響が大きいのは当然ながら、直流高速度遮断器や電車線路の故障率上昇の影響も大きくなることがわかる。また、その他の機器については多少故障率を上げてても現在の設備構成では供給不足発生確率にはあまり影響

がないことがわかる。



故障確率を低下させた機器

図8 各機器の故障確率を10分の1にした場合



故障確率を上昇させた機器

図9 各機器の故障確率を10倍にした場合

4. 考察

以上、今回モデル化した複線区間の直流き電系統の信頼度解析を行った結果、次のことが挙げられる。

(1) 供給支障発生確率について

この直流き電系統では供給支障発生確率が 10^{-8} オーダーの非常に小さな値であり、このシステムは信頼度が高いということがわかる。ただ、今回使用した故障確率は過去3年間の故障実績から算出しているため、その間故障が1、2件程度の機器もあり、確率として考えるためには母数が少ないと考えられる。このため、この解析結果の精度を向上させるためには、さらなる故障データの蓄積が必要であると考えられる。

(2) 機器故障確率の変化による供給支障確率について

ほとんどの機器が故障確率を改善しても供給支障確率に変化がない中で、正極用遮断器の故障確率を変動させると大きな変化が見られた。この機器は、一重系部分に設置されている機器であり、この機器の信頼度を向上し

た場合の供給支障確率は基準とした条件の約0.7倍に改善され、このモデル化した系統のポイントとなる機器であることがわかる。この正極用遮断器は直列に2台入れているので、この両方を改善したのであれば、大きく供給支障確率が改善されるのは当然ともいえる。

また、電車線路や直流高速度遮断器の故障確率の影響が若干大きく出たのは、直接負荷に接続していることと、き電系が4つの線に分かれていることが原因であると考えられる。それは、電車線路の故障確率を r とし、これが $r - \Delta r$ に改善されたと仮定すると、き電線全てが健全である確率は $(1-r)^4$ であるため、改善後の健全確率は $(1-r)^4 + 4\Delta r(1-r)^3 + \dots \div (1-r)^3 \cdot (1-r+4\Delta r)$ となり、他の機器に比べ約4倍の改善が見込めるためである。

二重系構成部分の主器用遮断器や整流器の供給支障確率に変化が少なかったことは、今回モデル化した隣接変電所を含むき電系統のモデルが、これら機器の故障をバックアップするだけの十分な信頼性と余裕を持って運転されていることが原因であると考えられる。

5. まとめ

本研究の結果、直流き電系統の信頼度を導き出す1つの手法として、変電所からの供給可能電力確率とそのときに負荷が必要としている電力量から、供給不足となる電力量とその確率を算出するという手法を確立することができた。

今回行った解析では故障確率の精度に課題があり、定量的な信頼度としてはまだ改善の余地があると考えられるが、この解析手法を用いて各機器の故障確率を変化させて比較することにより、直流き電系統の信頼度を向上させる上で重要となるポイントを把握することができる。

参考文献

- [1] Richard E. Brown ;
“Electric Power Distribution Reliability”,
Marcel Dekker Inc., 2002
- [2] 関根泰次；電力系統工学，電気書院，1976