

通信用電源の話 ～非常用発電機の軸ねじれ共振現象～

株式会社NTTファシリティーズ総合研究所
EHS&S研究センター 上級研究員
山下 隆司

前回のコラムでは直流給電系の発振現象について述べたが、今回は交流給電系で発生した異常振動である非常用発電機の軸ねじれ共振現象について述べる。

それは直流給電系の発振現象の発生からさらに前、今から約25年前に大型コンピュータシステムを設置した通信ビルで発生した。この通信ビルでは、竣工時における動作試験の一環として、停電時の給電動作確認のため、商用電源から非常用発電機への切り換え試験が実施されていた。非常用発電機は4,000kVAのガスタービンエンジン方式で、サイリスタ方式の2,000kVA UPS（500kVA モジュール4台+予備1台のN+1構成）を経由して負荷である大型コンピュータに給電される構成となっていた。切り換え試験時はUPSの出力として模擬負荷が接続されていたが、商用電源からガスタービン発電機へ切り換えた瞬間、ガスタービン発電機やUPSから同時に警報が発生し、UPSの出力が停止した。ガスタービンエンジンと発電機の間にはそれぞれの軸を結合して動力を伝達するカップリングがあるが、このカップリングに使用され、異常時には自らが壊れてエンジンと発電機を切り離すシャープピンという部品が破断していた。

本事象の原因は、当初はシャープピンを含めたカップリング部分の単なる部品不良と考えられていた。しかしその後も同様の試験を実施した際に、ガスタービン発電装置からの異常音発生や、発電機出力交流電圧が振動状態になるなどの異常がたびたび発生し、最終的にシャープピンの破断に至ることもさらに2回発生した。ここに至って、本事象が単なる部品不良ではなく、給電系全体に起因する現象であると考えられ、原因究明・対策実施のためのプロジェクトが立ち上げられた。

プロジェクトにおける検討では、まず給電系各部の電圧・電流の測定など発生現象の詳細な分析、発生しやすい条件の特定が進められた。ガスタービン発電機から給電した状態で、発電機出力電圧・電流、エンジンと発電機結合部分の軸トルクを測定した結果では、負荷となるUPSの台数を増加していくに従って、電圧・電流・軸トルク共に振動現象が次第に大きくなり、最終的には軸トルクが許容値を超えたタイミングでシャープピンが破断した。その後エンジンと切り離された発電機の回転速度が落ち、出力電圧・周波数が急速に低下するという現象となった。電圧・電流・軸トルクの振動周波数は約17Hzであり、これはエンジンと発電機結合部であるカップリングの共振周波数であることも確認された。また、発電機の給

電先として照明や空調など UPS 以外の負荷を接続した場合には振動現象は発生しにくくなり、UPS 負荷の比率が高いほど振動現象が激しくなることも確認された。エンジンと発電機の結合部に大きな軸トルクが発生し、シャープピンにストレスがかかるこのような現象は、軸ねじれ共振現象として知られたものではあるが、実際に特定の負荷設備との組み合わせによってシャープピンが破断するまでに至ったことはこれまで報告されていなかった。

一般的に給電系が不安定になる場合には、給電系の各ブロックで行われている安定化制御の相互作用で発生する可能性がある。ガスタービン発電機から UPS への給電系では、主に3つのブロックで安定化制御が行われている。まずガスタービンエンジンでは、エンジンの回転数を検出し、その回転数が一定値になるよう燃料流量を制御するガバナ制御が行われる。エンジンに結合された発電機では、発電機の出力電圧を検出して界磁電流^{*1}を制御し、出力電圧を安定化する制御が行われる。UPS は整流器部とインバータ部で構成されるが、整流器部出力の直流電圧を安定化するために整流器部の半導体スイッチを位相制御または PWM 制御している。

このうち、ガバナ制御の特性はガバナ単体と燃焼を合わせた特性で、その応答周波数は 2Hz 程度、発電機の界磁電流制御も応答周波数は 2Hz 程度で、いずれもそれ以上の周波数領域では制御できないため、発生している振動周波数 17Hz 付近の動作には影響しないと判断された。一方 UPS は入力電圧変動に対する安定化制御が 30Hz 程度まで動作することが確認できたため、振動周波数である 17Hz に対して影響を与える可能性があることが分かった。

最終的にはこれらのブロックをモデル化してシミュレーションすることによって、単独の動作では振動が発生しない機械的共振周波数（エンジンと発電機結合部であるカップリングの共振周波数）である 17Hz 付近で、UPS の電圧安定化回路の制御動作が加わることによって、振動現象が発生することが確認された。

振動現象の発生原因は解明できたが、それではなぜそれまでの通信ビルでは発生しなかったのだろうか。それは、それまでの通信ビルと異なり、発生したビルでは負荷設備のほとんどが UPS 経由という設備構成が初めて実現したビルであったためと考えられる。先に述べたように、UPS 経由以外の負荷設備が混在する場合は発生しにくいこと、UPS の制御動作が関係していることがその理由である。

振動現象が発生しないようにする対策は、UPS が安定化制御する周波数範囲から機械的共振周波数を離すことである。実際に実施された対策では、カップリングの剛性を高めて機械的共振周波数を約 17Hz から 20Hz へと高くする一方、UPS の安定化制御が 30Hz まで動作していたのを 20Hz 以下となるよう変更した。これにより機械的共振周波数付近での UPS の安定化制御の影響を無くし、機械的共振周波数による振動が増幅されないようにしたのである。

以上の検討を反映し、振動現象を発生させないための対策としては、「エンジン発電機の機械的共振周波数と負荷設備（UPS等）の安定化制御の応答特性を確認し、機械的共振周波数付近での安定化制御の動作領域が重ならないようにする」と一般化できる。しかし実際にこれを実現するのは非常に困難であった。非常用発電機の機械的共振周波数を確認することは比較的容易にできるが、負荷設備の安定化制御の応答特性を確認することが難しいのである。負荷設備が単一のUPSであればまだ可能性があるが、負荷設備としてUPS以外に整流装置やインバータ制御の空調機等が混在する場合、それらの負荷設備全体としての安定化制御特性を求めることは不可能に近い。

そのため、現実的で確実な方法は、実際の設備構成による動作確認である。この場合、UPSや整流装置、インバータ制御の空調機などは最終的な設備規模とする必要がある。直流給電系の発振現象では、負荷電流の値が発振条件（不安定条件）に直接関係するため、負荷電流が小さいときは発振の兆候が全くなく、ある電流値になると突然発振が始まるが、非常用発電機の機械的共振周波数による振動現象は、その発生条件に負荷電流が直接は関係しないため、負荷が小さい段階から振動の兆候が確認できる可能性がある。厳密にはUPSや整流装置に接続される設備の種類や稼働状況、インバータ制御の空調機の稼働状況の影響もあるため、エンジン発電機の負荷を最大にして確認する必要があるが、負荷が小さい段階で振動の兆候によってシステムの不安定性を確認することが期待できる。

*1 一般的に交流発電機は、周りに配置されたコイルの中で磁石を回転させて発電する。回転させる磁石は電流を流して磁力を発生させるいわゆる電磁石で、その流れる電流が界磁電流である。電流を大きくすれば磁力が強くなるので発電電圧が上がり、逆に電流を小さくすれば磁力が弱くなり発電電圧が下がる。界磁電流を調整することで発電機の出力電圧を調整することができる。

（2020年11月5日 山下 隆司）

※掲載された論文・コラムなどの著作権は株式会社NTTファシリティーズ総合研究所にあります。これらの情報を無断で複写・転載することを禁じます。また、論文・コラムなどの内容を根拠として、自社事業や研究・実験等へ適用・展開を行った場合の結果・影響に対しては、いかなる責任を負うものでもありません。

ご利用になりたい場合は、「お問い合わせ」ページよりご連絡・ご相談ください。