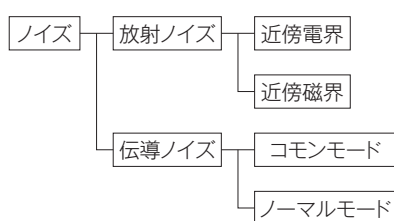


強電磁界中の計測技術向上

姉川憲永 Norihisa Anegawa
大石和城 Kazuki Oishi

キーワード 信号処理技術、光ファイバ、EMC

概要



ノイズの分類

「骨太開発」における設計及び解析結果を評価するため、検証試験を行った。検証試験の対象は、主に電磁界解析・熱流体解析・構造解析である。しかし、発電機内部は強電磁界の影響でS/N（Signal-Noise）比が非常に悪く、良いデータを取得できない問題が以前からあった。

この「骨太開発」では、上記のような計測の問題を解決するため、当社試験場の計測におけるノイズ対策を検討した。ノイズは、空間を伝搬する放射ノイズと導線を伝わる伝導ノイズに分けられる。これらのノイズを調査して対策することでひずみ計測を実現した。さらに、光ファイバセンシングシステムは強電磁界の環境下で有効であることを示した。

1 まえがき

設計及び解析結果を評価するため、発電機内部の磁束・温度・風速・静圧・ひずみ・加速度・変位などを計測した。この中でひずみ計測はS/N（Signal-Noise）比が悪く、以前からノイズ対策に苦労していた。ノイズは、空間を伝搬する放射ノイズと導線を伝わる伝導ノイズに分けられる。放射ノイズは近傍電界と近傍磁界に分けられ、伝導ノイズは導線と接地間で電位差が発生するコモンモードノイズと導線間で電位差が発生するノーマルモードノイズに分けられる。また発電機内部は、センサを設置するスペースが狭いため計測点数が限られ、発電機内部の温度分布を計測するために、十分なセンサを設置することができない問題もある。

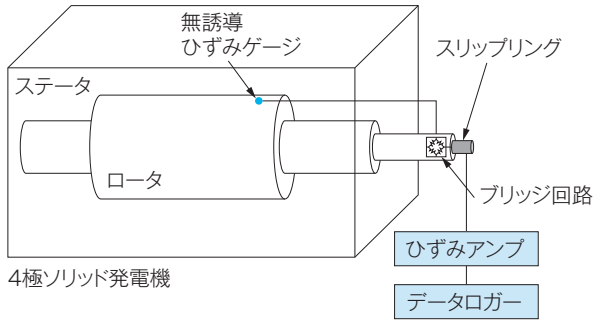
本稿では、4極ソリッド発電機内部の計測技術向上を目的として、ノイズ状況の調査とノイズ対策を

行った結果を紹介する。さらに、光ファイバによるひずみ計測と温度分布計測を行い、ノイズ対策とセンサ設置点数の問題をまとめて解決した。

2 ひずみ計測の構成

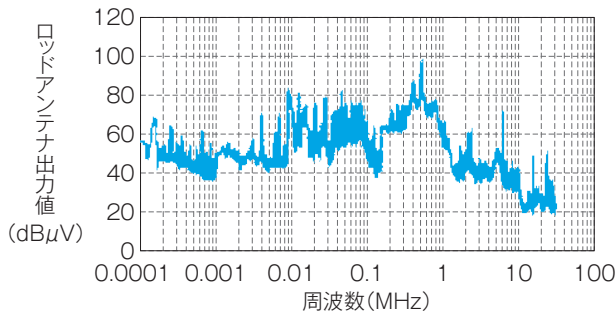
第1図にひずみ計測の構成を模式図で示す。ロータのポールシューボルトに設置した無誘導ひずみゲージの信号は、ロータに設置したブリッジ回路を通してロータ先端のスリップリングで静止側へ伝達し、ひずみアンプへ入力する。ひずみアンプの出力は、データロガーへ入力してノートパソコンで計測データを解析する。

放射ノイズは発電機のロータの軸中心に対して水平方向へ3m離れた位置でロッドアンテナと磁界暴露テストを用いて計測し、伝導ノイズは電流プローブで計測した。これらの放射ノイズ及び伝導ノイズ



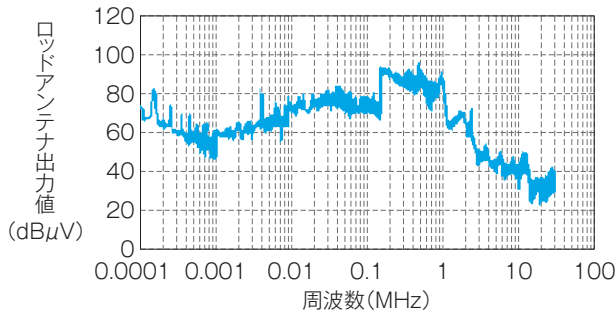
第1図 ひずみ計測システムの模式図

ひずみ計測の構成を模式図で示す。



第2図 近傍電界計測結果（完全停止）

発電機周辺の近傍電界の計測結果を示す。



第3図 近傍電界計測結果（鉄損ヒートラン）

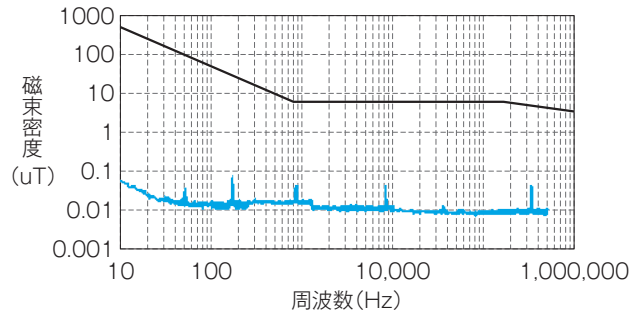
発電機が稼働しているときの近傍電界を示す。発電機から放射されるノイズが小さいことが分かる。

の計測は、通常作業時のノイズ状況を調査することを目的として、工場が稼働中の時間帯に実施した。

3 放射ノイズ計測

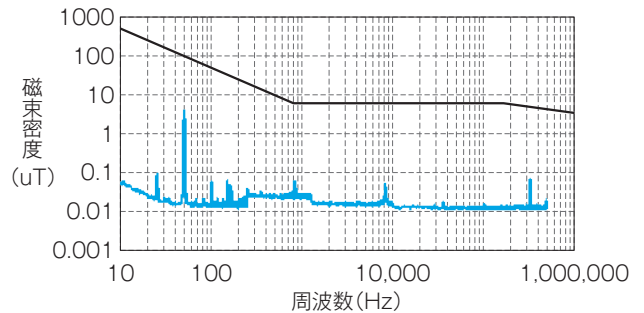
3.1 近傍電界

第2図に発電機の回転及び界磁電流が停止し、駆動機の電源も停止した状態（以下、完全停止）における近傍電界の計測結果を示す。第3図に発電機の



第4図 近傍磁界計測結果（完全停止）

発電機周辺の近傍磁界の計測結果を示す。



第5図 近傍磁界計測結果（銅損ヒートラン）

発電機が稼働しているときの近傍磁界電界を示す。発電機から放射されるノイズが小さいことが分かる。

回転数及び出力電圧が定格値、出力電流0Aの状態（以降、鉄損ヒートラン）の近傍電界の計測結果を示す。第2図では、発電機が完全停止しているにもかかわらず100kHz～1MHzの広帯域で比較的大きいノイズが発生している。第3図では、第2図と比較してスペクトルが変化しているが、電界の強さは特に変わらない。これらの電界レベルは小さく、一般的なオフィスと比較して同程度のレベル⁽¹⁾であるため、電界が計測へ及ぼす影響は小さいと考える。

3.2 近傍磁界

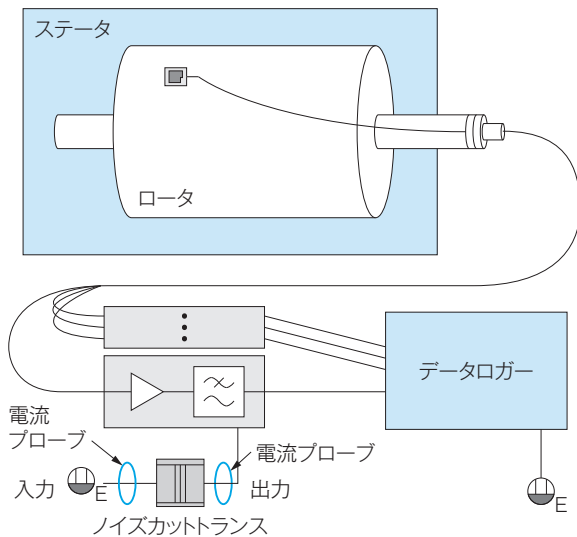
第4図に発電機が完全停止しているときの近傍磁界計測結果を示す。第5図に発電機の回転数及び出力電流が定格値、出力電圧は0Vの状態（以下、銅損ヒートラン）における近傍磁界の計測結果を示す。両図とも縦軸が磁束密度、横軸が周波数を表し、IEC 62233⁽²⁾の許容値を図中の黒線で表示している。第4図に対して第5図は50Hzと25Hzに比較的大きいピークが発生しているが、IECの許容値に対し

てノイズレベルが低いことから、磁界が計測へ及ぼす影響も小さいと考える。

4 伝導ノイズ計測

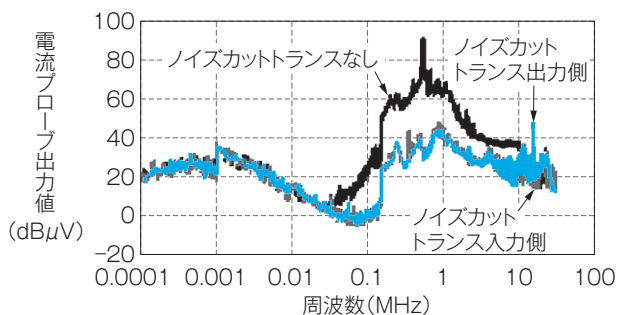
4.1 電源系統のコモンモードノイズ

電源系統に設置したノイズカットトランスの前後で伝導ノイズを計測した。第6図に電源系統の伝導ノイズ計測位置を、第7図に電源系統のコモンモードノイズ計測結果を示す。第7図は、縦軸が電流プローブ出力値、横軸が周波数を表し、ノイズカットトランスの入出力とノイズカットトランスがない場合を比較している。ノイズカットトランスなしでは100kHz～1MHzの広帯域で比較的高レベル



第6図 電源系統の伝導ノイズ計測位置

計測器の電源系統の伝導ノイズについて、コモンモードノイズの計測位置を模式図で示す。



第7図 電源系統のコモンモードノイズ計測結果

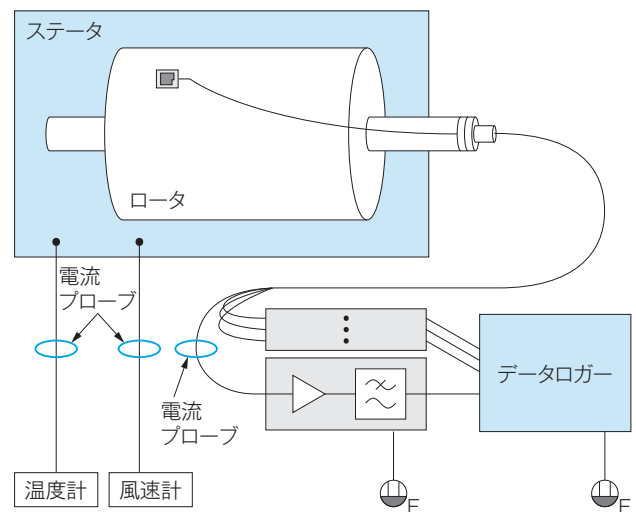
計測器の電源系統の伝導ノイズについて、ノイズカットトランスで高周波数帯域のノイズを低減できていることを示している。

のノイズが発生している。この広帯域ノイズは近傍電界の計測結果でも表れているため、電源系統のノイズが電界として現れていると考えられる。

4.2 信号系統のコモンモードノイズ

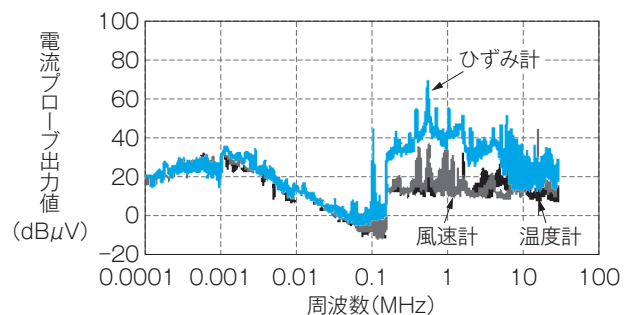
温度・風速・ひずみの計測システムにおけるノイズレベルを比較した。第8図に各計測システムのノイズ計測位置を、第9図にノイズレベルを比較した結果を示す。第9図は、縦軸が電流プローブ出力値、横軸が周波数を表している。温度と風速に比べてひずみは100kHz以上で非常に大きいことが分かる。この比較結果から、高いノイズレベルの発生はひずみ計測システム特有の現象であることが分かった。

次にひずみアンプ計測で発生するノイズについて



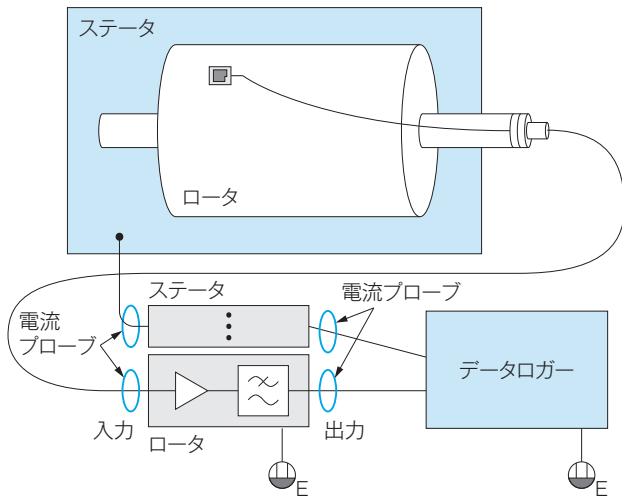
第8図 各計測システムのノイズ計測位置

温度・風速・ひずみの各計測システムで信号系統のコモンモードノイズを計測した位置を模式図で示す。



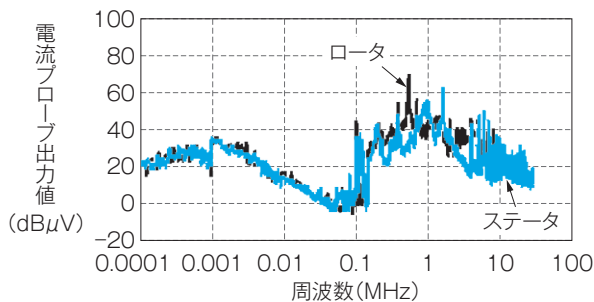
第9図 各計測システムのノイズレベル比較結果

温度・風速に対してひずみ計測は非常に大きいノイズが発生することを示している。



第10図 各ひずみ計測システムのノイズ計測位置

発電機のロータとフレームそれぞれの計測システムで信号系統の共通モードノイズを計測した位置を模式図で示す。



第11図 各計測システムのノイズレベル比較結果

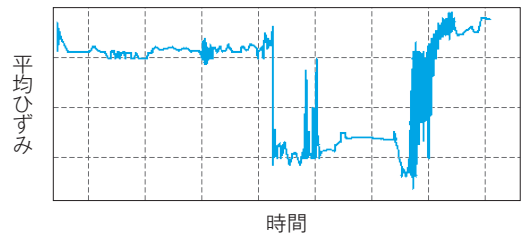
ロータとステータのひずみ計測によるノイズレベルの比較結果を示す。ロータの方がノイズレベルが高い結果を示している。

て、ロータとステータの違いを検討した。第10図に各ひずみ計測システムでノイズを計測した位置を、第11図に各計測システムのノイズレベルを比較した結果を示す。第11図は、縦軸が電流プローブ出力値、横軸が周波数を表している。同図の計測結果から、100kHz付近より高周波数帯域でロータのひずみ計測の方が比較的ノイズレベルが高いことが分かった。

さらに、ロータのひずみ計測について発電機の運転状況の違いを比較したところ、駆動機によってノイズが大きく変化することが分かった。

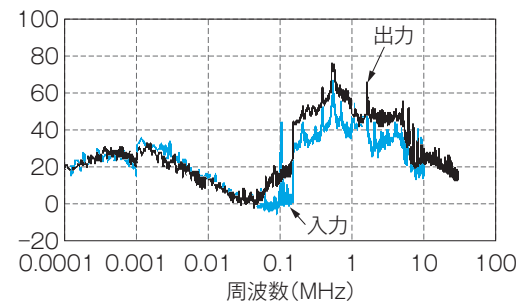
5 平均ひずみ異常対策

機械の振動特性に対して、通常のノイズが発生す



第12図 発電機のメカランで発生した平均ひずみ異常

発電機がメカランのときに発生した平均ひずみ計測値の異常を示す。



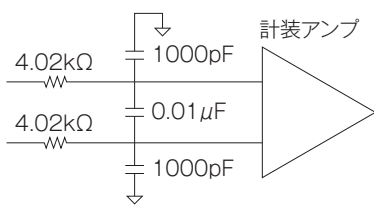
第13図 ひずみアンプの入出力のノイズ比較結果

ロータのひずみ計測について、ひずみアンプで共通モードノイズが発生していることを示す。

る周波数帯域は十分高い場合が多く、LPF (Low-Pass Filter) を用いることで計測結果を解析することができる。しかし、直流成分で大きいノイズが発生し、平均ひずみ値が異常な値を示す現象が発生する可能性がある。第12図にポールシューボルトのひずみ計測で発生した平均ひずみ異常を示す。界磁電流を停止した状態でロータの回転数を変化（以下、メカラン）させて計測した結果で、縦軸が平均ひずみ、横軸が時間を表している。同図は設計値の10倍以上の異常な値を示し、回転数上昇による遠心力の変化に依存しない不規則な変化を示している。この現象の原因調査として、第11図で示したロータのひずみ計測特有の伝導ノイズを詳しく検討した。第13図にロータのひずみ計測について、ひずみアンプ入出力のノイズレベルを比較した結果を示す。それぞれ縦軸が電流プローブ出力値、横軸が周波数を表し、青線がひずみアンプへの入力、黒線がひずみアンプからの出力を表している。これらの図から、ロータのひずみ計測では信号をひずみアンプへ通すことによって共通モードノイズが大きくなることが分かった。ここで、様々な共通モードノイ

ズ対策を実施したが効果がなかったため、ノーマルモードノイズ対策を実施した⁽³⁾。第14図に対策として用いたRCフィルタの模式図を示す。このRCフィルタはノーマルモード及びコモンモードに対してLPFとなり、カットオフ周波数が1.9kHzである。

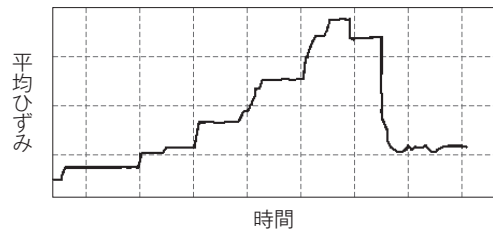
第15図にRCフィルタを通して平均ひずみを計測した結果を示す。縦軸が平均ひずみ、横軸が時間を表している。第12図とは違い、設計値と同程度の計測結果を得ることができ、回転数上昇による遠心力効果も観測できている。



第14図 RCフィルタの模式図

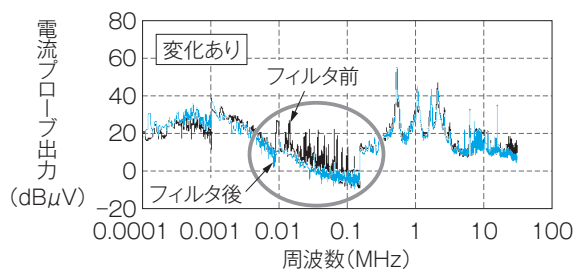
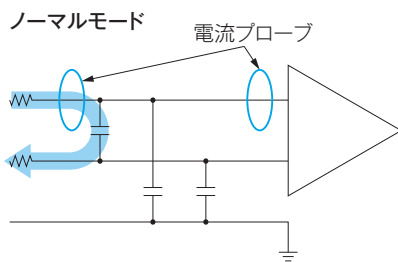
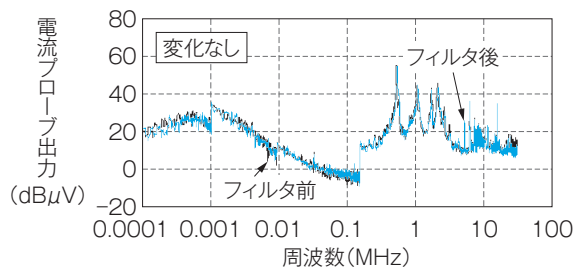
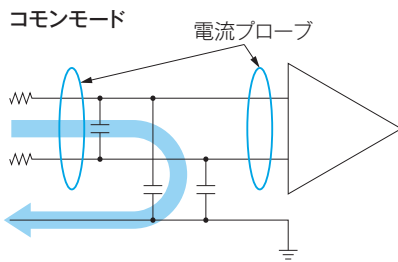
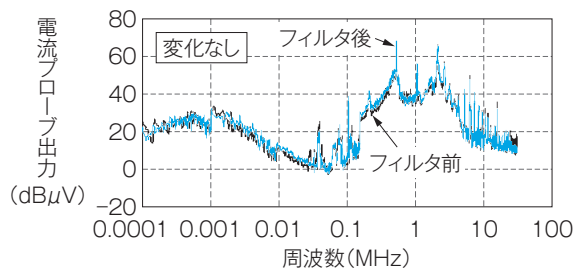
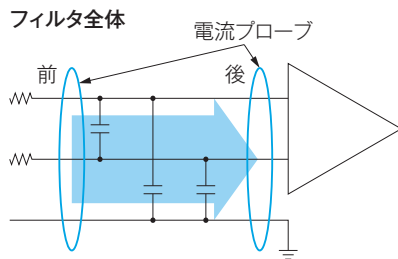
平均ひずみ異常の対策として、ノーマルモードノイズを除去するためのRCフィルタの模式図を示す。

平均ひずみ異常を引き起こすノイズに対するRCフィルタの効果を詳しく考察した。第16図にRCフィルタ前後の信号を比較したノイズ発生メカニズムの考察結果を示す。同図上段はフィルタを構成する全ての信号線のノイズレベル、同図中段はグラウンド以外の信号線（コモンモード）のノイズレベル、同図下段は信号線1本のみ（ノーマルモード）のノイズレベルで、全て縦軸が電流プローブ出力値、横軸が周波数である。これらの計測結果から、RCフィルタがノーマルモードに効いていることが分か



第15図 RCフィルタ対策後の平均ひずみ計測結果

ノーマルモードノイズ対策で平均ひずみを正常に計測できていることを示す。



第16図 ノイズ発生メカニズムの考察結果

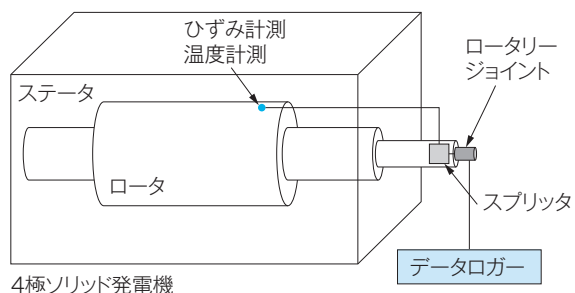
ノーマルモードでノイズが平均ひずみ異常の原因であることを示す。

り、平均ひずみ異常の原因はノーマルモードノイズであることが分かった。

6 光ファイバによる計測

光ファイバは、土木構造物のモニタリングで盛んに用いられている。光ファイバはガラスなど絶縁体で構成され、光の波長を信号としているため耐ノイズ性に優れている。さらに光ファイバは、小スペースに多数のセンサを設置できる利点もある。これらの長所を利用して、発電機内部のひずみ計測、さらに発電機内部の冷却性能評価を目的とした温度分布計測を光ファイバで試みた。光ファイバの計測方法及び種類は幾つかあるが、ひずみ計測は株共和電業(株シミアス)のFBG(Fiber Bragg Gratings)式光ファイバセンサを使用し、温度分布計測は株富士テクニカルリサーチのFBI-Gaugeを使用した。

FBGは光通信の分野でフィルタとして開発された技術を利用したセンシング技術で、電気抵抗式のひずみゲージに比較的近い精度が得られるといった特長を持っている⁽⁴⁾。第17図にFBGによるひずみ計測の構成を示す。ポールシューボルトにFBGを数点設置し、スプリッタを通した後ロータリージョイントで静止側へ信号を伝達してデータロガーへ信号を入力している。また、FBGはひずみだけでなく温度も計測できるため、ポールシューボルトに設置したFBGの一つを温度センサとして使用した。第18図にFBGで計測したひずみのスペクトルを、第19図にひずみゲージで計測したスペクトルを示す。両図は発電機がメカランのときの計測結果

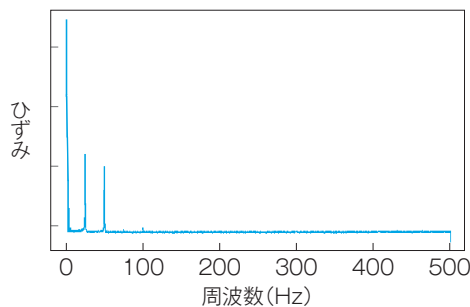


第17図 FBGによるひずみ計測の構成

ポールシューボルトにFBGを数点設置し、スプリッタ・ロータリージョイントを通して計測器に入力する構成を示している。

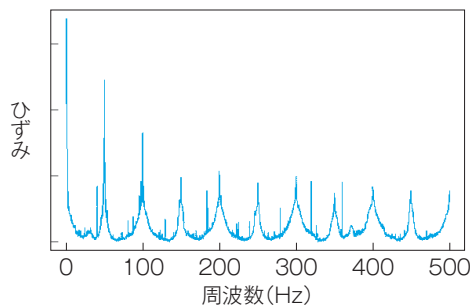
で、縦軸がひずみ、横軸が周波数を表している。第19図は、平均ひずみである直流成分と回転1次成分である25Hzのピークを明確に表示しているため、ノイズの影響を受けずに計測できていることが分かる。しかし第19図はノイズ成分が大きく、回転1次成分のピークが分かり難い。この計測結果から、FBGによる計測はノイズの影響を受けることなく、発電機内部の計測に有効であることが分かった。

第20図にFBI-Gaugeによる温度分布計測の構成を示す。FBI-Gaugeは波長可変レーザを光ファイバに入射し、光ファイバ内のガラス分子によって反射してくる微小な反射光を検出するセンシングシステムで、5mm間隔の計測ができる⁽⁵⁾。したがって、熱電対などでは計測できなかった小さなスペースで非常に多くの点数を計測できる。本項では、スロット内部の鉄心を取り巻くアマチュアコイルとステータコアに設置したFBI-Gaugeで温度分布を計測した結果を紹介する。第21図にアマチュアコイルとFBI-Gaugeの設置箇所を示す。FBI-Gaugeは発電機の製造工程の途中でスロット内に埋め込む



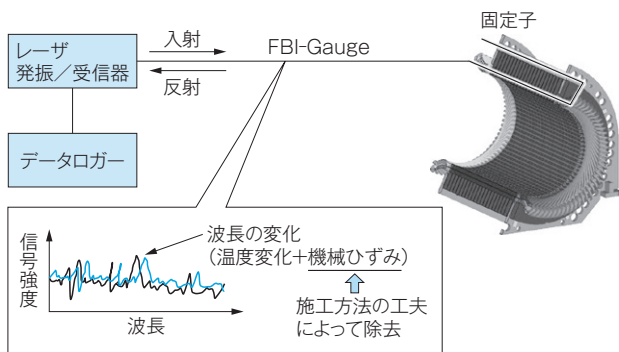
第18図 FBGによるポールシューボルトのスペクトル

FBGはノイズの影響を受けずにひずみを計測できていることを示している。



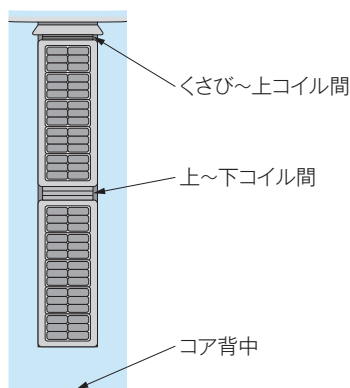
第19図 ひずみゲージによるポールシューボルトのスペクトル

ひずみゲージはノイズ成分が大きく、S/N比が悪いことを示している。



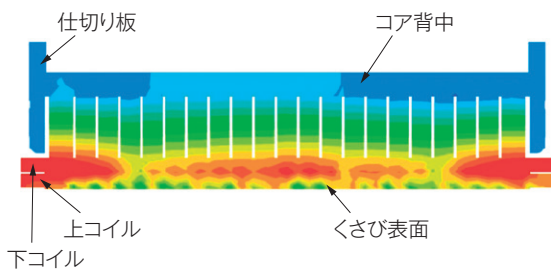
第20図 FBI-Gaugeによる温度分布計測の構成

アマチュアコイルに設置したFBI-Gaugeを計測器に入力する構成の模式図を示す。



第21図 アマチュアコイルとFBI-Gaugeの設置箇所

アマチュアコイルに設置したFBI-Gaugeの箇所を示す。



第22図 FBI-Gaugeによる温度分布計測結果

FBI-Gaugeで計測したアマチュアコイルとステータコアの温度分布を示す。

が、光ファイバの特性上機械的な衝撃に対して非常に弱く、その施工方法には多くの工夫が必要だった。特にコイルはめ込み時のストレスや高電圧に耐える保護管と設置個所の選定には多くの事前検証を要した。第22図にFBI-Gaugeによる温度分布計測結果を示す。ステータコアの断面を表し、下側がスロットに設置したアマチュアコイル、上側がス

テータコアの外表面である。そして、青色は低い温度、赤色は高い温度を表している。この計測結果が示すように、今まで熱電対などでは分からなかった温度分布が明らかとなった。

7 むすび

4極ソリッド発電機内部のひずみ計測を対象としてノイズ計測及び対策を行い、以下の点が明らかとなった。

- (1) 発電機のひずみ計測で発生するノイズは、駆動機の影響が大きい。
- (2) ノーマルモードノイズが原因で平均ひずみ値異常が発生する場合があるが、RCフィルタを用いることで計測できる。
- (3) 光ファイバセンシングシステムを用いることで、ノイズの影響を受けず、多くの点数で計測できる。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 環境省環境保健部環境安全課編：「身のまわりの電磁界について」, 2014.4
- (2) IEC 62233, Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure, 2005
- (3) ANALOG DEVICES アプリケーションノート, AN-671
- (4) 根本・森山・藤島：「FBGを用いた光ファイバセンサ」, 日本機械学会第7回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, 2008/No.08, 40
- (5) 株式会社富士テクニカルリサーチ：「FBI-Gauge特徴と計測原理」, http://www.ftr.co.jp/n/products/fbi_gauge/measure.html, 2018

《執筆者紹介》



姉川憲永
Norihisa Anegawa
基盤技術研究所
機械力学分野の研究開発に従事



大石和城
Kazuki Oishi
基盤技術研究所
回転機絶縁技術の研究開発に従事