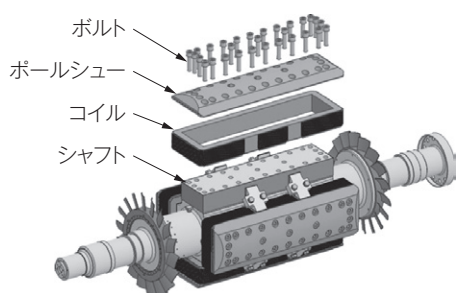


# 4極ソリッドポール発電機におけるボルト締結管理法

高津一誠 Kazushige Takatsu  
落合美鈴 Misuzu Ochiai

キーワード 4極ソリッドポール発電機、大径ボルト、締結管理法、軸力管理、弾性域回転角法、塑性域回転角法

## 概要



4極ソリッドポール発電機の回転子

4極ソリッドでは、磁極外径側でフィールドコイルを支持する部品であるポールシューを締結するボルトに対して、運転中に大きな負荷がかかる。一方で、繰り返し荷重を抑えるためには軸力（締結力）を上げる必要があり、締結力許容範囲の制約は厳しい。そこで、その制約を満たす、高精度に締結力を管理できる締結管理法を開発した。

一般的な締結管理法であるトルク法では、軸力を締め付けトルクから推定し、基準値を満たすように指示トルクを定める。しかし、軸力の推定精度は非常に低く、制約が厳しい場合は管理できない。開発した締結管理法では、軸力を直接計測することで制約の厳しい場合でも管理できるようにした。さらに作業効率を向上させるため、締結方法に弾性域回転角法を用いる改善も実施した。

## 1 まえがき

4極ソリッドポール発電機は、積層コア突極発電機と比べて定格回転数が高く、またロータ径が大きくフィールドコイル質量が大きい。そのため、フィールドコイルに作用する遠心力は大きくなる。フィールドコイルは、磁極外径側に取り付けられたポールシューによって支持されるため、ポールシューを磁極に締結するポールシューボルトには運転時に大きな軸方向の引っ張り荷重（軸力）が追加される。一方、繰り返し荷重を抑え、ゆるみを防止するためには高い締結力が必要なため、ポールシューボルトの締結力許容範囲は上下限值ともに制約が厳しくなる。トルク法などの締結力に大きなバラツキが生じる従来の締結管理法では、許容範囲を満たすことができない。そこで、ポールシューボルトの締結では、締結力を精度よく管理できる締結管

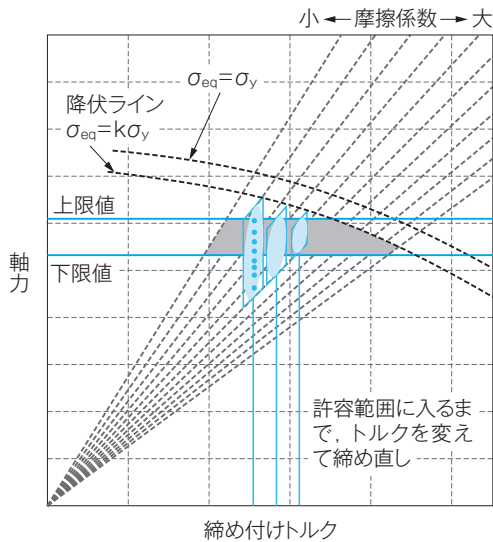
理法が必要となる。本稿では、ボルト締結体の特性に影響する各種因子の確認試験を行い確立した締結管理法を紹介する。

## 2 弾性域軸力管理法

締結力を精度よく管理するために、締め付け法としてはトルク締めを使用しつつ、軸力そのものを直接管理対象とする締結管理法（以下、弾性域軸力管理法）を開発した。以下に管理基準値と管理方法及びその根拠となった試験・検証を説明する。

### 2.1 弾性域軸力管理法の基準値

第1図に締め付け管理図を示す。弾性域軸力管理法では、3つの基準値を設けている。締結時に静的強度を超えないための降伏ライン、運転時に静的強度を超えないための上限値、運転時の繰り返し荷



第1図 締め付け管理図

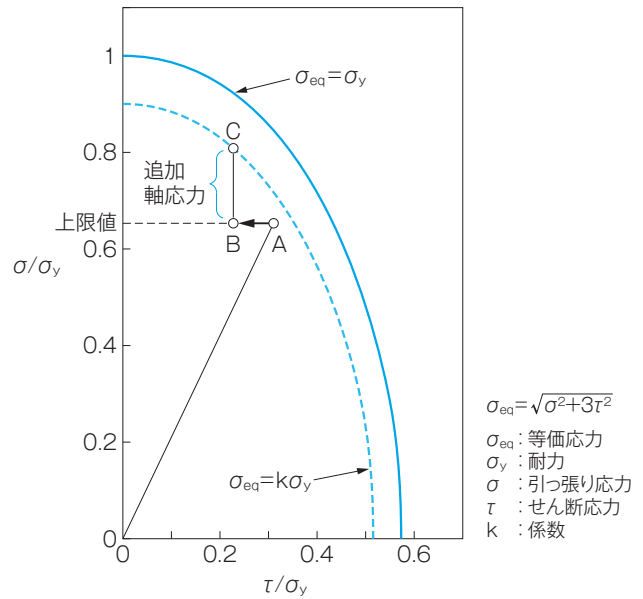
上限値・下限値・降伏ラインを示す。管理上使用する降伏ラインは、等価応力 ( $\sigma_{eq}$ ) が耐力 ( $\sigma_y$ ) に達するラインから余裕をみて引き下げている。

重を抑えるための下限値である。

(1) 下限値 ポールシュー上には多数本のポールシューボルトを配置している。有限要素法 (FEM) による応力解析を繰り返し行い、ボルトに付加される繰り返し荷重をなるべく低減させた配置を実現し、その条件を満たす最低限の締結力を求めている。その締結力に軸力計測の誤差を考慮した値を下限値としている。ただし、初期締め付け時の下限値は、後述する初期ゆるみ分を考慮して引き上げている。これによって、増し締めを必要性を低減させている。

(2) 降伏ライン 第2図に等価応力・上限値・追加軸力の関係を示す。ポールシューボルトには、合金鋼製ボルトを使用している。トルク締めするボルトには、軸力による引っ張り応力と軸トルクによるせん断応力が重畳する。その場合、鉄鋼材料は等価応力に従って降伏するため、等価応力がボルト耐力の最小値を超えないようにし、さらに軸力及び軸トルクの計測誤差を考慮したラインを基準としている。軸トルクは実機で直接計測できないため、締め付けトルクからの推定値を使用する。

(3) 上限値 運転時にコイルの遠心力による追加軸力が付加されても、等価応力が降伏ラインを超えない締結力を上限値とする。この場合、軸トルクは締め付け完了直後に低減するため、それを考慮して



第2図 等価応力・上限値・追加軸力の関係

引っ張りとなねじりが重畳するボルト締結過程では、上式に示した等価応力 ( $\sigma_{eq}$ ) が耐力 ( $\sigma_y$ ) に達したときに降伏する。点線は計測誤差を考慮した降伏ラインである。また、運転時の追加軸力をB-C、締め付け直後の軸トルク低下をA-Bとすると、Aの位置が上限値となる。

上限値を決めている。この過程を第2図中の矢印で示す。

## 2.2 軸力のバラつき低減を実現する軸力管理

一般的なトルク法では、締結力を締め付けトルクと摩擦係数のバラつきから統計的に推定しており、推定値のバラつきは非常に大きい。そのため、狭い許容範囲に収まるよう締結力を管理することはできない。そこで弾性域軸力管理法では、超音波軸力計を用いて軸力を全数計測することで軸力を直接管理することとした。それにより、軸力計の計測誤差範囲まで管理可能範囲を狭めることができる。第3図に超音波軸力計を示す。軸力計を選定する場合には、計測精度だけではなく、センサの設置位置や製品ボルトに対する加工制限を考慮した。第4図に弾性域軸力管理法とトルク法との比較を示す。

## 2.3 弾性域軸力管理法の影響因子と検証試験

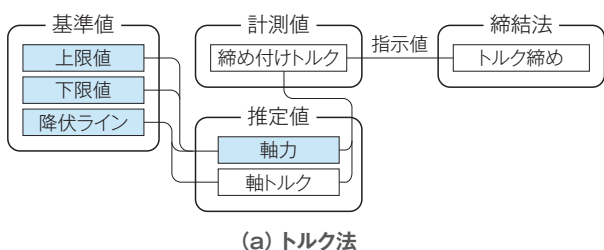
弾性域軸力管理法の基準値を適正に求めるため、基準値に影響を与える各種因子について検証試験を行った。



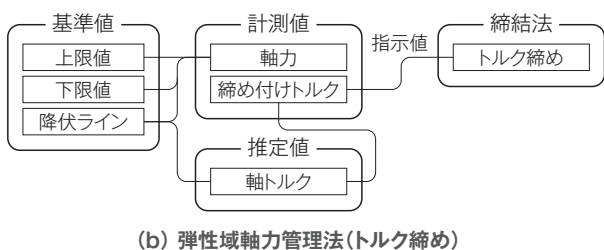
第3図 超音波軸力計

超音波軸力計で無負荷時の長さを計測している様子を示す。トランスデューサの取り付け誤差を低減させるため、位置合わせ用の治具を製作し使用している。

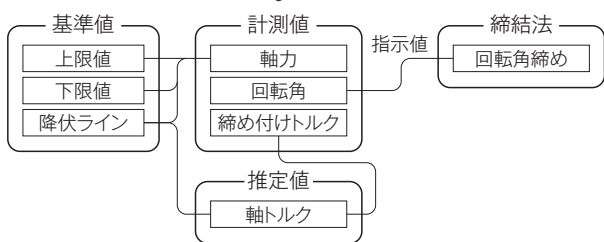
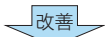
.....



(a) トルク法



(b) 弾性域軸力管理法(トルク締め)



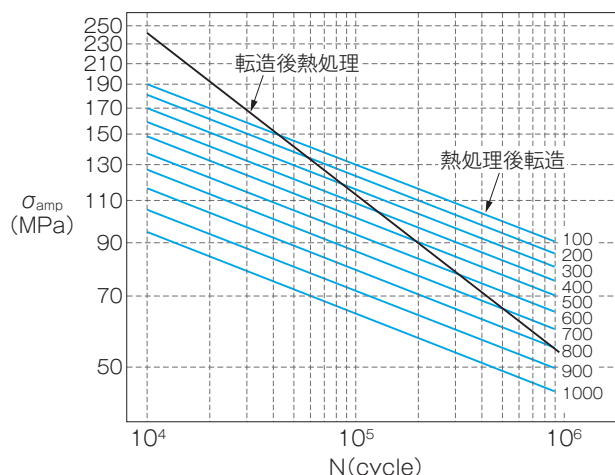
(c) 弾性域軸力管理法(回転角締め)

第4図 弾性域軸力管理法とトルク法との比較

一般的な締結管理法であるトルク法と確立した弾性域軸力管理法との比較を示す。トルク法では軸力に精度の低い推定値を用いているため、基準値の範囲を狭めることができない。

### 2.3.1 軸力計の原理と校正試験

使用した軸力計は、ボルト軸方向の伝搬時間を計測するタイプの超音波軸力計である。頭部の六角穴底とねじ先とが軸直角な平面となるように加工した



第5図 VDI2230 Blatt1 (2003) 高強度ボルトの疲労強度参考値

高強度ボルトのS-N線図を示す。熱処理後転造で製造されたボルトは、平均応力の影響を受けるとしている。各線の右端の値が平均応力の値である。また、静的強度やボルト径にも依存している。本図は強度区分10.9のM36ボルトの例である。

ボルトを用い、圧電素子のトランスデューサを設置させた頭部側からパルス波を照射し、ねじ先からのエコーを受信し、その伝搬時間を計測する。材料に応じた伝搬速度を指定することで、伝播時間からあらかじめ無負荷時に計測した長さとの差を取って伸びを計測できる。また実機とグリップの長さを合わせて引っ張り試験を行い、荷重と伸びの関係を求めておくことで、伸びから軸力を計測できる。なお、超音波伝搬速度は温度や応力にも依存するが、この荷重-伸びの校正試験で応力の影響を含めて校正できる。温度の影響は恒温槽を使った試験を行い、係数の妥当性を確認した。

### 2.3.2 疲労強度

大径ボルトの疲労強度データは、参考となる文献や事例がほとんどない。ドイツ技術者協会規格VDI 2230 Blatt1 (2003)には、呼び径(及び熱処理後転造のボルトでは平均応力)をパラメータとした式が定義されているが、根拠が明示されておらず、あくまでも「目安」とであると記載されている<sup>(1)</sup>。そこで使用する予定の全サイズ(M36~M64)のボルトで実物による疲労試験を行い、平均応力の影響や呼び径の影響を確認した。第5図にVDI2230 Blatt1 (2003) 高強度ボルトの疲労強度参考値を、第6図にボルト疲労試験の様子を示す。





第6図 ボルト疲労試験

実体ボルトを使用して疲労試験を実施した。

### 2.3.3 運転時の追加軸力

FEM解析で求めた運転時の応力値の妥当性を確認するために、開発機でロータ回転中にポールシューボルトなどに生ずるひずみを計測し、解析の精度が十分であることを確認した。

### 2.3.4 ゆるみ

4極ソリッド発電機は、変動トルクが少ないタービンで駆動されることを前提としている。そのためポールシューボルトへの負荷荷重は、起動時に付加される軸方向荷重のみと考えてよい。その場合、締結力と同等の外力が作用しない限り回転型のゆるみは生じない。またFEM解析や開発機での試験結果から、熱によるゆるみや過大な座面圧による陥没ゆるみは生じないことを確認した。そこで、接触面の表面の粗さや機械加工によって生じた凹凸が面圧によって潰れることで生じるゆるみに対して、集中的に検証することとした。締結した状態で軸力変化が落ち着くまで長期間計測する試験や開発機で起動停止を繰り返しボルト全数の軸力変化を確認する試験を行った。

### 2.3.5 摩擦係数

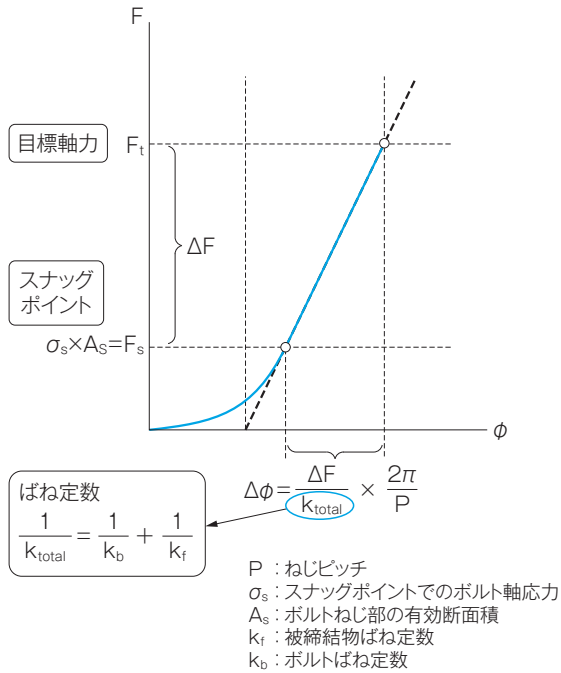
トルク締めでは、締結力は摩擦係数の影響を強く受けるため、実際に締結する場合には、摩擦係数を確認する必要がある。弾性域軸力管理法では、締め

付けトルクから軸トルクを推定する場合にも摩擦係数を使用している。摩擦係数はある程度バラつくが、座面摩擦係数とねじ部摩擦係数の比が固定であるとすれば、軸トルク推定での感度はそれほど高くない。

## 2.4 締め付け時の指示値の求め方

開発当初はトルク締めを採用したが、作業効率の向上を図るため、回転角締めによる方法に変更した。(1)トルク締めによる方法 軸力許容範囲を大きく下回る低トルクで仮締めし、摩擦係数の範囲を確認して、本締め用の指示トルクを決定する手順としている。この際、降伏ラインを超えないように管理する。そしてボルト軸力を計測し、上下限値を逸脱したボルトは、新たに指示トルクを決定し締め直す。この手順を全てのボルトの締結力が許容範囲に収まるまで繰り返す。また降伏ラインを超えてしまった場合は、ボルトを交換する。

(2)回転角締めによる方法 トルク締めによる方法では、前回締め付け時の摩擦係数を基に次の指示トルクを決定している。しかし、同一ボルトを締め直す場合でも摩擦係数は変動するため、締め直し回数が増えたり、降伏ラインを超えたりして作業効率が悪くなる場合があった。そこで、摩擦係数の影響を受けにくい回転角締めに切り替えることとした。回転角締めはボルトの回転角と軸力の関係をあらかじめ求めておき、回転角と軸力が比例する範囲で角度を指示値として締め付けを行うものである。第7図に弾性域回転角法を示す。回転角と軸力の関係は締め始めた段階では非線形であるが、座面が着座し軸力がある程度生ずるとほぼ線形となる。この点をスナッグポイントと呼び、ここまではトルクを指定して締め付けるのが一般的である。そこで初期の非線形の影響が大きいと、結局のところトルク締めによる締結力の変動割合が増えてしまう。初期の非線形性は座面の接触面剛性の影響で生じるが、座面の加工精度を管理していたため、非線形性がごく小さい軸力の範囲でほぼ終了していた。そのため、スナッグポイントを小さくでき、締結力のバラつきを減らせたことで作業効率を改善できた。



第7図 弾性域回転角法

座面の接触状態が安定し、回転角(φ)とボルト軸力(F)の関係が線形になるスナッグポイント以降は、ボルトばね定数(k<sub>b</sub>)と被締結物ばね定数(k<sub>f</sub>)とを合成した直列ばねで回転角が求まる。

### 3 むすび

4極ソリッドポール発電機におけるボルト締結管理法を紹介した。現在は、ボルト軸力のバラつきや繰り返し荷重を更に低減させることができる塑性域回転角法の開発に取り組んでいる。第1表に塑性域回転角法の影響因子と検証試験を示す。塑性域回転角法に固有の影響因子の確認試験を進めており、更なる品質向上につなげていく。

第1表 塑性域回転角法の影響因子と検証試験

塑性域回転角法へ影響を与える各種因子と、その影響を確認するために実施中又は計画中の試験を示す。

因子種類	影響因子	試験
締結時	スナッグポイント	スナッグポイント確認試験
	ばね定数	ボルトばね定数計測 合成ばね定数計測
	ボルト耐力	耐力確認試験
	摩擦係数	塑性域締め付け試験
締結後	常温リラクセーション	常温リラクセーション試験
	外力負荷時のゆるみ	繰り返し起動停止試験
	運転時追加軸力の余裕	外力受け入れ試験
	塑性域締め付けでの疲労	疲労試験

・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) ドイツ技術者協会：「VDI2230 Blatt1 (2003) 高強度ねじ締結の体系的計算法—円筒状一本ボルト締結—」, 日本ねじ研究協会, 2006, pp.57-60

#### 《執筆者紹介》



高津一誠  
Kazushige Takatsu  
基盤技術研究所  
発電機の開発業務に従事



落合美鈴  
Misuzu Ochiai  
回転機システム工場  
発電機の開発業務に従事