不平衡負荷時の同期発電機定常特性に関する パーミアンスモデルによる検討

正員 松村 年郎 (名古屋大)

正員 高瀬 冬人 (京都大)

正員 上田 皖亮 (京都大)

A Study on Steady-State Characteristics of a Synchronous Generator under Unbalanced Load Conditions by a Permeance-Based Air-Gap Flux Density Analysis

Toshiro Matsumura, Member (Nagoya University), Fuyuto Takase, Member, Yoshisuke Ueda,
Member (Kyoto University)

Static characteristics of 6 kVA scaled-down synchronous generator under the extreme unbalanced-load conditions are discussed. The waveforms of field and armature currents, and the flux linkage of a search coil are measured and simulated for different single-phase loads and unbalanced three-phase loads. Simulations are carried out by using the permeance-based air-gap flux analysis method which have been developed in our previous paper.

The simulated results are well agreed with experimental ones not only for fundamental components but also for higher harmonic components. It shows that our permeance-based method can be used to estimate easily a air-gap flux as well as electrical characteristics of a synchronous generator under various static load conditions. The following features are made clear quantitatively. The higher harmonic components are superposed in field currents as well as armature currents under unbalanced-load conditions. Resonance behaviors occur for not only fundamental component but also higher harmonic components under the capacitive-load conditions. The demagnetization and magnetization in a synchronous generator are estimated easily by using our permeance-based method.

キーワード：同期発電機，不平衡負荷，パーミアンス，共振現象，ギャップ磁束，減磁・増磁作用

1. はじめに

これまでの同期発電機の解析は主として平衡三相状態を対象としたもので，不平衡負荷時における同期発電機の特性はほとんど明らかにされていないといっても過言でない。また，電力系統の不平衡状態を解析する簡易な方法として対称座標法があるが，発電機内部磁束にまで立ち入った考察はできない⁽¹⁾。そこで，本資料では，同期発電機の不平衡負荷時における電気

的・磁氣的定常特性に対して，実験および計算機シミュレーションの両面からの考察を試みた。供試機としては定格容量 6 kVA の 4 極回転界磁型の小型突極同期発電機を取上げ，制動巻線がなく，磁束の飽和が生じない状態での検討を行っている。

著者らは，これまで，小型供試同期発電機の電機子歯頭部に設置した探りコイルを用いて，ギャップ部の磁束密度分布の挙動を実測してきた⁽²⁾。それとともに，同期発電機内部の磁気回路に注目し，巻線構造お

よびパーミانس分布からギャップ磁束密度分布算定手法を取上げ、それが同期発電機内部の磁気的および電気的特性を十分な精度で簡潔に算定できることを明らかにし、本算定手法を同期機のパーミانسモデルとして提案した⁽³⁾。そこでは、a相端子を開放し、bc相間にのみ誘導性の単相負荷を接続した不平衡負荷状態の一つの例を取上げ、モデルの妥当性を実験的に示した。

本資料は、数種の不平衡負荷状態に対して、著者らのパーミانسモデルにより供試発電機の特性を算定し、実測値との比較検討を行ったものである。ここで取上げた不平衡負荷は、bc相間のみ抵抗性、誘導性および容量性の各種単相負荷を接続した場合、ならびに誘導性負荷と容量性負荷とが混在する不平衡三相負荷である。このような極端な不平衡負荷状態は平常時の電力系統においてはほとんど現れないが、パーミانسモデルの妥当性の検証という意味で取上げた。

また、電気的特性として、界磁電流波形および電機子電流波形を取上げ、磁気的特性として、電機子歯頭部に設置した探りコイルの誘導起電力波形（ギャップ磁束密度に対応）を取上げた。その結果、進相負荷と発電機のインダクタンスとの間に基本波成分だけでなく、高調波成分に対しても共振現象が現れることを定量的に解析できた。それにより、共振現象が生じるような場合を含めて各種不平衡負荷時について、同期発電機の定常特性の算定に本パーミانسモデルが十分適用できることが確認できた。

2. パーミانسモデルの概要⁽³⁾

ここでは、文献(3)で著者らがパーミانسモデルとして提案した新しい発電機モデルの概要を示す。パーミانسモデルの概念図を図1に示す。同図は発電機内部の特性値相互および負荷との関係を表し、ギャップ磁束密度や各種電流波形の算定手順を示したものである。

本モデルにおいて、入力はい界磁励磁電圧と負荷のインピーダンス (Z_{ab}, Z_{bc} および Z_{ca}) とであり、それにより、ギャップ磁束密度分布を含めて発電機各部の電圧・電流が算定できる。図1の関係は商用周波数の基本波だけでなく、高調波に対しても成り立っている。従って、本発電機モデルは、巻線構造や不平衡負荷によって生じる高調波の影響もシミュレートできる特徴をもっている。

3. 供試発電機の概要および不平衡負荷試験

〈3・1〉 供試発電機 本資料で検討対象とした供

図1 パーミانسに基づく同期発電機モデル
Fig.1. A synchronous generator model based on permeance distribution.

図2 供試同期発電機の断面図
Fig.2. A cross section of the tested synchronous generator.

試発電機は定格容量 6 kVA の 4 極回転界磁型突極機で、その断面を図2に示す。電機子歯頭部に探りコイルが設置され、ギャップ磁束を測定できるようになっている。本供試機的设计諸元やギャップ部のパーミانس分布など、パーミانسモデルによる特性算定に必要なパラメータ値は、文献(3)に示したとおりである。

本供試機においては実機相当の磁束飽和特性をもたせているが、本資料では飽和が生じない領域を取扱うこととし、界磁電流を 1.0 A として、公称誘導起電力 220 V を発生させるための界磁電流 3.2 A よりか

なり小さくした。この場合、無負荷運転時の線間電圧は125 Vであった。なお、制動巻線は取付けていない。

〈3・2〉 単相負荷試験 本資料では主として、図3(a)に示すようにbc相間のみに単相負荷 Z を接続し、a相端子を開放した場合について検討している。これは $Z_{bc}=Z$ 、 $Z_{ab}=Z_{ca}=\infty$ であり、発電機にとっては最も極端な不平衡三相負荷の一つと考えられる。単相負荷 Z としては、力率1の純抵抗性負荷、ほぼ遅れ力率0の誘導性負荷および進み力率0の容量性負

荷の3種類とした。

それぞれの負荷条件において、界磁電流波形、b相電機子電流波形（負荷電流波形）および探りコイル誘導起電力波形を取上げ、本モデルによる算定結果と実測結果との比較検討を行う。特に、b相電流においては、基本波成分および第三調波成分を抽出し、それぞれ算定値と実測値との比較を行う。また、探りコイル誘導起電力波形は、同期発電機のギャップ磁束密度分布の様相を示すもので、モデルによる算定においては、界磁電流と電機子電流の影響とに分けて検討を加えている。

〈3・3〉 不平衡三相負荷試験 図3(b)に示すような誘導性負荷と容量性負荷とが混在する極端な不平衡三相負荷状態について、単相負荷時の場合と同様の検討を行った。発電機がこのような負荷状態に陥ることはほとんど考えられないが、著者らのモデルの妥当性および有用性を示すうえで取上げた。ここでは、その一例として、abおよびbc相間の誘導性負荷をそれぞれ25 mHおよび14 mHとし、ca相間に接続した容量性負荷の大きさを变化させた場合について検討している。本資料ではこの条件での負荷を不平衡LLC三相負荷と称することにする。

図3 不平衡負荷試験回路

Fig. 3. Circuit configuration of unbalanced-load test of synchronous generator.

4. 不平衡負荷時の界磁電流およびb相電流波形

ここでは、各種負荷条件における界磁電流波形およびb相電流波形の一例を表1にまとめて例示する。

表1 不平衡負荷時における同期発電機の界磁電流波形および負荷電流波形例
Table 1. Field and armature current waveforms of the tested synchronous generator under unbalanced-load conditions.

同表の左三つが単相負荷時で、左から $17\ \Omega$ の抵抗性負荷、 $25\ \text{mH}$ (抵抗成分 $0.84\ \Omega$) の誘導性負荷 ($60\ \text{Hz}$ の基本波に対するインピーダンス $9.5\ \Omega$)、 $100\ \mu\text{F}$ の容量性負荷 (基本波に対するインピーダンス $26.5\ \Omega$) の場合である。また、同表最右欄は不平衡 LLC 三相負荷時で、ca 相間のコンデンサの容量を $100\ \mu\text{F}$ とした場合である。

同表上段が界磁電流波形 $i_f(t)$ 、下段が b 相電流波形 $i_b(t)$ であり、それぞれ $60\ \text{Hz}$ の 1 周期分について図示されている。時間の原点は、a 相巻線軸と d 軸とが一致した時点としている。パーミアンスモデルによる算定値を破線で、実測値を実線で表しており、いずれの負荷状態においても両者はよい一致を示していることがわかる。

表 1 の各波形において、界磁電流には $1\ \text{A}$ の直流に交流成分 (主として第二調波成分) が重畳しており、b 相電流には $60\ \text{Hz}$ の基本波に高調波成分 (主として第三調波成分) が重畳している。本実験のような不平衡負荷では、逆相の負荷電流が流れるため、回転子とは逆方向に回転する磁界成分が発生し、それにより界磁巻線に第二調波電流が流れる。更にその第二調波の界磁電流のため、電機子巻線に第三調波電流が流れると考えられる。本モデルでは、表 1 に示すように、このような現象を簡単に定量的に評価できている。

5. b 相電流の基本波および第三調波成分

前章においては、各負荷条件において、それぞれ一例ずつ検討したに過ぎない。そこでここでは、負荷インピーダンスの大きさを変えた場合について考察する。b 相電流波形 $i_b(t)$ から、基本波成分 $I_b^{(1)}$ および第三調波成分 $I_b^{(3)}$ を抽出し、それぞれの大きさを実効値で表し、それぞれモデルによる算定結果と実測結果との比較検討を行う。抵抗性単相負荷の場合を図 4 に、誘導性単相負荷の場合を図 5 に、容量性単相負荷の場合を図 6 に、不平衡 LLC 三相負荷の場合を図 7 に示す。ただし、縦軸を対数目盛りで表し、横軸には基本波に対する負荷のインピーダンスの大きさをとっている。各図の実線および破線がそれぞれモデルにより算定した $I_b^{(1)}$ および $I_b^{(3)}$ である。また、各図○印および△印がそれぞれ実測した $I_b^{(1)}$ および $I_b^{(3)}$ である。

各図において、基本波成分および第三調波成分ともに実測値とモデルによる算定値とがよい一致を示しており、本モデルの妥当性が示されている。まず、図 4 の抵抗性負荷時と図 5 の誘導性負荷時とを比較する。基本波成分に関しては、負荷インピーダンスの増大に対してどちらの場合も同様の減少様相を示している。

図 4 抵抗性単相負荷時の b 相電流
 Fig. 4. Dependence of b-phase current on impedance of resistive single-phase load.

図 5 誘導性単相負荷時の b 相電流
 Fig. 5. Dependence of b-phase current on impedance of inductive single-phase load.

図 6 容量性単相負荷時の b 相電流
 Fig. 6. Dependence of b-phase current on impedance of capacitive single-phase load.

図7 不平衡 LLC 三相負荷時の b 相電流
Fig. 7. Dependence of b-phase current on c-phase impedance of unbalanced three-phase load.

第三調波成分は、誘導性負荷時のほうが減少割合が大きい。これは誘導性負荷の場合、高調波に対するインピーダンスが周波数に比例して高くなるためである。

図6および図7のように容量性負荷を含む場合は、他の負荷とは異なって、同期機内部インダクタンスとの共振現象が基本波だけでなく第三調波成分にも現れている。この現象について、図6の容量性単相負荷の場合を例にとって次章で詳しく考察する。

6. 容量性単相負荷時の b 相電流に関する検討

図6に示したように、本モデルによる基本波成分の算定結果によれば、 $|Z|=10\ \Omega$ 付近で b 相電流 (同図の実線) が 100 A 以上に達している。このことは、実測において定格電流以上の電流が流れ、測定不能であったことから裏付けられている。この現象は、同期機のインダクタンスと容量性負荷とが直列共振を起こすためと考えられる。

本不平衡単相負荷時において、負荷端から同期発電機を見た場合のインピーダンスは、二相短絡時と同様に、正相インピーダンス Z_1 と逆相インピーダンス Z_2 との和で与えられると考えられる。本供試機における滑り法やダルトン-カメロン法による測定によれば、 $Z_1=j6.9\ \Omega$ 、 $Z_2=j3.8\ \Omega$ である。従って、基本波に対しては、負荷端から $Z_0=Z_1+Z_2=j10.7\ \Omega$ が見えることとなり、これが容量性負荷と共振を起こしているといえる。

次に、第三調波成分についてみれば、破線は $|Z|=10\ \Omega$ 付近のほか、 $|Z|=65\ \Omega$ (第三調波に対する大きさは $21.7\ \Omega$) 付近でも極大値を示している。文献(4)によれば、第三調波に対する同期機の高調波リア

(a) 抵抗性単相負荷時 ($R=17\ \Omega$)

(b) 誘導性単相負荷時 ($L=25\text{mH}$)

(c) 容量性単相負荷時 ($C=100\ \mu\text{F}$)

(d) 不平衡 LLC 三相負荷時 ($C_{ca}=100\ \mu\text{F}$)

図8 探りコイル No. 1 の誘導起電力波形
Fig. 8. Voltage waveforms induced in search coil No. 1.

クタンス $X^{(3)}$ は 1 相当たり $X^{(3)}=1.5(X_d''+X_q'')$ であるといわれている。ただし、 X_d'' : 直軸初期過渡リアクタンス、 X_q'' : 横軸初期過渡リアクタンスである。

本実験条件においては、負荷からは 2 相分のリアクタンスが見えるので、負荷と $2X^{(3)}$ とが直列接続されていることになる。本供試機におけるダルトン-カメロン法による測定では、 $X_d''=j2.41\ \Omega$ 、 $X_q''=j5.94\ \Omega$ である。従って、 $2X^{(3)}=j25.05\ \Omega$ となり、負荷の第三調波に対するインピーダンス $-j21.7\ \Omega$ と打ち消し合って、大電流が流れるものと推定される。

7. 不平衡負荷時の探りコイル誘導起電力波形

同期発電機の特性解析において、ギャップ磁束の振

舞いの把握が重要である。ここでは、ギャップ磁束に対応するものとして、供試発電機の電機子歯頭部に a 相巻線軸から電気角で 130° の位置に設置されている探りコイルを取上げる。その探りコイルの誘導起電力波形を、表 1 に示した負荷例に対して、図 8(a)～(d) に示す。各図にはモデルによる算定値を破線で、実測値を実線で表している。各図において、いずれの負荷条件においても破線と実線とはよく一致しており、本モデルの妥当性がこの面からも確認できた。

(a) 抵抗性負荷時 ($R=17\Omega$)

(b) 誘導性負荷時 ($L=25\text{mH}$)

(c) 容量性負荷時 ($C=100\mu\text{F}$)

(d) 不平衡 LLC 三相負荷時 ($C_m=100\mu\text{F}$)

図 9 探りコイル No.1 の鎖交磁束数
 Fig. 9. Flux linkage of search coil No. 1.

そこで以下では、本モデルによる算定値について考察を加えることにする。

ここでは、図 8 の探りコイル誘導起電力を時間積分したもの、すなわち探りコイル鎖交磁束数を取上げる。本モデルでは、磁束密度分布を界磁電流の影響と電機子電流の影響とに分けて検討することができる。そこで、探りコイル鎖交磁束数に関して、界磁電流による成分と電機子電流による成分とに分けて、それぞれを図 9 の各図に一点鎖線および破線で示している。両者を比較することにより、電機子電流による減磁・増磁効果の検討が本モデルで可能になっている。例えば、(b) 図の誘導性負荷の場合、電機子電流による寄与成分は界磁電流による成分を打ち消す方向に現れており、減磁作用を示している。それに対して、(c) 図の容量性負荷の場合には、両者は同位相であり、増磁作用を示している。また、不平衡 LLC 三相負荷の場合は、誘導性負荷の影響が強く、該当探りコイルにおいては減磁作用により基本波成分がかなり打ち消されている。

8. む す び

同期発電機の不平衡負荷時における定常特性の定量的考察を試みた。6 kVA の小型供試同期発電機の bc 相間のみに単相の抵抗性、誘導性および容量性負荷を接続した場合、ならびに誘導性負荷と容量性負荷とが混在する不平衡三相負荷を接続した場合について検討した。これらの極端な不平衡負荷状態において、界磁電流、b 相電流および電機子歯頭部の探りコイル誘導起電力の各波形を実測し、著者らが提案しているパーミアンズモデルによる解析を行った。それにより、同期発電機の不平衡負荷時における下記の電氣的・磁氣的定常特性を定量的に明らかにすることができた。

(1) 容量性負荷が含まれる場合、電機子電流の基本波成分だけでなく高調波成分においても、発電機の内部インダクタンスと負荷との共振現象が現れる。

(2) 探りコイルの鎖交磁束数の波形を界磁電流および電機子電流の影響に分けて本モデルにより算定し、電機子反作用の減磁・増磁効果を定量的に把握できた。

以上により、パーミアンズモデルが、共振現象が生じるような場合を含めて、不平衡負荷時の定常特性算定に十分な精度で適用できることが確認できた。

今後、本パーミアンズモデルにおいて、飽和、制動巻線、渦電流などの影響を考慮できるよう拡張し、最終的には過渡状態に適用できるように改良する予定である。

最後に、本実験に協力された本学大学院修士課程学生 岡本 明氏（現、NTT 勤務）および本学卒業研究生 中尾昭彦氏（現、東芝勤務）に感謝いたします。また、本論文の掲載にあたっては(財)関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の助成を受けたことを記して感謝の意を表す。

（平成4年5月25日受付，同4年8月3日再受付）

文 献

- (1) E. W. Kimbark: Power System Stability III Synchronous Machines (1956) John Wiley & Sons
- (2) 上之園・上田・七原・金子:「定態時における同期発電機の空けき磁束とそれに基づく特性解析」, 電学論B, **102**, 281 (昭57-5)
- (3) 高瀬・松村・上田:「パーミアンスによるギャップ磁束密度算定手法に基づく同期発電機モデル」, 同上D, **111**, 865 (平3-10)
- (4) 水間・匂坂・瀬里・関根:「静止変換器をもった同期機の高調波解析 (その2)」, 同上B, **105**, 459 (昭60)

松 村 年 郎 (正員)

昭和26年5月1日生。54年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学助手，62年2月同講師，平成元年3月京都大学講師，4年1月名古屋大

学助教授，現在に至る。工学博士。主として，大電流電気エネルギーに関する研究，回転機空隙磁束の挙動に関する研究に従事。

高 瀬 冬 人 (正員)

昭和31年3月3日生。58年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。同年(株)日立製作所入社。61年京都大学助手，現在に至る。主として，電子回路の非線形現象の研究，メカトロニクスの制御系の研究，同期機の空隙磁束の研究に従事。63年電気関係学会関西支部奨励賞受賞。工学博士。

上 田 皖 亮 (正員)

昭和11年12月23日生。39年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学助手，42年同講師，46年同助教授，60年同教授，現在に至る。主として，電気・電子回路における非線形現象の研究，空隙磁束からみた回転電気機械の諸特性に関する研究に従事。工学博士。