U.D.C. 621. 313. 322. 016. 313. 019. 3:621. 313. 3-25. 017. 71

大容量タービン発電機の不平衡負荷耐力 Unbalanced Loading Capabilities of Large Turbine Generators

近年におけるタービン発電機の単機容量の増大は著しいが、これとともに系統事 故、あるいは不平衡負荷時の逆相電流による回転子表面の加熱現象が発電機寸法を 直接制約し、また電食、あるいは異常振動を誘発する要因になってきている。この ため、これまでと同程度以上の信頼性を確保して大容量化を図るためには、より綿 密な検討と加熱耐力の向上策が必要となる。本稿は、この問題の解明の基礎となる 回転子のうず電流、損失及び温度上昇を実機形状に即して解析する考え方を述べ、 解析の結果を不平衡負荷耐力の向上策として用いるダンパ巻線の種類と対比し、大 容量機では全長ダンパ巻線が効果があり、今後の大容量化に対処できる方策である ことを述べた。

高橋典義*	Noriyoshi Takahashi
川村 隆**	Takashi Kawamura
桑名勇治**	Yûji Kuwana

1 緒 言



面の状態により異なり,局部温度上昇や電食発生の原因とな りやすい。この傾向は大容量化による電気・磁気装荷の増大 とともに強まり,回転子構成導体の許容温度限界,温度分布 不均一による軸振動の誘因とも関連して,大容量化に対する 機械寸法を直接制約する要因となってきている。

る。てして、この電流に含まれる小丁菌方は「放に逆相電流 と呼ばれ、これにより生ずる磁界は回転子速度と同期しない 成分であるため、回転子導体に電流を誘導し、回転子の加熱 の原因となる。

図1は回転子の導体構成と加熱の原因となる誘導電流の経路の様子を示しているが、それぞれの導体は界磁コイルを除けば電気的に絶縁されていないのが普通であり、このため電流の経路も単純ではなく、電流の一部は導体間の接触面を通しても流れるようになる。特に胴部においては、短長ウェッジの突合せ部のティース鉄心まわりで、あるいは剛性バランス用クロススロット端の近傍で電流が集中するようになるため損失密度も大きくなる。また胴端部では、鉄心から保持リング、あるいはダンパリングへの電流の移行は導体間の接触

従って,発電機の大容量化に際しては不平衡電流による回 転子の加熱耐力の定量的な把握が重要となってくるが,この ためには,回転子の実際の形状に即したうず電流現象と温度 上昇との解明が必要であり,また大容量化に適応できる対策 が必要となる。ここでは,これらの検討結果を不平衡耐力の 向上策として装着されているダンパ巻線の種類と対応させて, 効果の数値例による比較とモデル機による測定例とを中心に 示し,大容量化に対処するための方策について述べる⁽¹⁾。

2 解析方式の概要

回転子の誘導電流による加熱温度上昇限界を精度よく求めるためには、回転子の実際の形状(図1,2)と導体材料の電





39

図 | 回転子の導体構成と誘導電流の経路 誘導電流の分布は導体 図 2 回転子胴部断面の導体構成 誘導電流は導体相互の影響が大き 間の接触状態により異なり,また電流集中による局部温度上昇の原因ともなる。 いため,実際の形状に即した解析を行なった。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場

208 日立評論 VOL. 58 No. 3 (1976-3)



回転子の不平衡負荷耐力の解明に対する解析方式 大容量化に伴う回転子の加熱耐力をより 図 3 精度よく算定するため、実際の回転子の形状・構成を考慮した解析が必要となる。

磁気的,熱的要因を考慮して解析する必要がある。図3に解 析方式の概要をまとめて示すが,要因としては同図に記した る比較検討ができるようにした。 ものを考慮し、要因の相互影響の比較ができるようにした。 これにより, 例えば導体寸法, 配列, あるいは導体の固有抵 抗,導体間の接触抵抗などを変えた場合の影響を知ることが できるとともに, ウェッジ突合せ部のウェッジ電流のまわり 込みによる鉄心部損失密度の増大なども求められるようにし た。また回転子胴端部では胴部を流れてきた電流がリターン するが,この場合の端部の構成導体にどのように電流が配分

されるかを導体の構成,材質,あるいは接触抵抗の相違によ

図4は胴端部を含めた電流経路を集中回路形式で示したも のである。



1.	胴部軸方向電流	IRRC	ダンパ リング↔保持リング
I_E	鉄 心	3.	胴端部周方向電流
I w	ウェッジ	I RING	ダンパ リング
I _B	ダンパ バー	IRET	保持リング
2.	導体間移行電流	I WE	ウェッジからの分岐
EWC	鉄心↔ウェッジ	IEE	ティースからの分岐
WBC	ウェッジ↔ダンパ バー	ICE	胴部鉄心端面
ERC	鉄心←→保持リング		

❸ 数値例によるダンパ巻線の効果の比較

解析式により各種要因の影響に対する試算結果のうち、こ こでは大容量化に際して不平衡負荷耐力の向上に効果のある ダンパ巻線につき、これの種類を変えた場合の比較を示す。



胴部導体電流の胴端部での配分経路 胴部電流は, 胴端部で 义 4 の導体構成,あるいは導体間の接触状態により配分が異なってくる。

40

図5 ダンパ巻線の種類 (1)ダンパ巻線は不平衡負荷耐力の向上に役立 つ。(2)日立製作所は、700MVAまでは部分ダンパ巻線を適用してきた。

3.1 ダンパ巻線の種類

ダンパ巻線は不平衡負荷や負荷変動時において生ずる磁界 の動揺を抑制する積極的な作用をもち、銅などの導電率の大 きい材料から作られている。図5は日立製作所におけるター ビン発電機用のダンパ巻線の種類を示すが、巻線は胴部のバ ーと胴端部のリングとで構成され、バーはスロット ウェッジ の下側に(図2)、またリングは保持リングの下側に配置され る(図1)。図5(a)は短絡発電機などの特殊運転用を除き、こ れまで日立製作所で700MVA級の発電機にまで適用してきた 方式であるが、エンド リングと胴端部のスロットに挿入され るフインガ バーとからなり、これを「部分ダンパ巻線」と称 している。これに対し同図(b)は、胴周面の界磁スロット部だ けに全長にバーを設ける方式の「不完全全長ダンパ巻線」で あり、また同図(c)は磁極部にもバー専用のスロットを設け、 回転子全周面の全長にバーをもつ「完全全長ダンパ巻線」で ある。

3.2 670MVA-2 極機における比較例

670 MVA-2 極機を例にとり,図5(a)の部分ダンパ巻線を比較の基準とした全長ダンパ巻線の効果を以下に示す。但し,固定子電流の不平衡分(逆相電流)は同一としている。

図6に回転子の損失配分と胴部軸方向電流の配分の比較を示す。まず同図(b)の電流配分についてみると、全長ダンパ巻線とすることにより鉄心と界磁コイルの電流負担が減少し、

は端部において導体間の接触面を通して移行する電流の配分 を示すが、これより全長ダンパ巻線とすることによってこの 移行電流は全体として減少し、接触面での局部温度上昇低減 に役立つことが分かる。但し、ダンパ リングと保持リング間 の移行電流は大きくなっており、両リング間の接触状態に対 しては十分注意すべきことが指摘される。

次に図8は、胴部のそれぞれの導体の温度上昇分布を部分 ダンパ巻線の場合と完全全長ダンパ巻線の場合とを比較して 示す。同図より完全全長ダンパ巻線は温度上昇の低減に役立 つとともに、回転子全周にわたって温度上昇分布を均一にす る効果のあることが分かる。これは不平衡負荷耐力の向上に 極めて有効であることを意味している。同図にはウェッジ突 合せ部のティース鉄心の温度上昇も示しているが、この部位 はウェッジ電流のまわり込みがあるため、電流が集中するよ うになりウェッジ中央部位のティース鉄心に対して約2倍と なっている。また部分ダンパ巻線の場合に対しては、クロス スロットまわりの温度上昇を示しているが、クロス スロット を設けることにより、磁極部鉄心の温度上昇を平均的に下げ るが、クロス スロット端では電流が集中するため、局部的に 高くなっている点に注意を要することを示している。

4 モデル試験機による回転子導体電流の測定例

4.1 モデル機の概要

その分ダンパ巻線が受け持つようになる。これを同図(a)の損 失についてみると,鉄心の損失が減少し,特に磁極部にもバ ーがある完全全長ダンパ巻線の場合は減少の著しいことが指 摘される。この顕著な減少は,磁極部鉄心の損失が小さくな ることによるもので,鉄心温度上昇の低減に対し極めて効果 がある。

また図7は、胴端部の電流配分について比較したものであ る。まず同図(a)で周方向電流の配分についてみると、ダンパ 巻線の種類に関係なく電流の大部分はダンパリングと保持リ ングの両者でそれぞれ約半分ずつを分担していることが分か る。但し、全長ダンパ巻線の場合は胴部のダンパパー電流が 加わるため、電流量としては増えるようになる。一方、同図(b) 逆相電流による回転子のうず電流現象と温度上昇分布の実態を詳細に調べるため,表1に示すように容量2,500kVAの試験機を製作し,これに回転子各部の電流,磁束,温度を計るための測定素子およそ500個を取り付け測定を行なった。このうち回転子導体の電流分布の測定例を計算と比較して記す。なお図9はモデル機による測定時の状況を示すものである。

4.2 回転子導体電流の測定例

まず図10にティース鉄心ごとの軸方向電流について示す。 測定はティース根元に周方向の穴を設け、ティースを取り囲 む測定素子コイル(ロゴスキー コイル)を巻き付けてこれに誘 起する電圧より求める方法をとっている。測定結果は、図示 のように同一のティースであっても電流は同一ではなく、ウ







図6 回転子損失及び胴部電流の配分 (1)部分ダンパ巻線を比較の基準。(2)完全全長ダンパ巻線は,鉄心の電流と損失を減らすのに効果がある。

図7 胴端部での電流配分 (1)部分ダンパ巻線を比較の基準。(2)全長ダンパ巻線とすることにより導体間の移行電流が減る。

41

210 日立評論 VOL. 58 No. 3 (1976-3)



図8 回転子導体の温度上昇分布 完全全長ダンパ巻線とすることにより鉄心温度上昇が低減し、しか も全周にわたって温度分布が均一化される。

表 | モデル機の主な仕様 回転子の各部に電流,磁束及び温度測定用の素子計500個を取り付け,うず電流による加熱の状態を詳細に測定した。

項目		仕 様
容	量	2,500kVA
定格電	圧	3,300∨
定 格 電	流	438A
極	数	4
回転子	径	915mm
回転子有効	長	500mm
ウェッジ	材	アルミニウム
ダンパ巻	線	完全全長巻線(銅)
保持リン	グ	非磁性鋼(焼きばめ)

注:図10,11,12における試験条件

42

固定子=三相-60Hz, 印加起磁力=√2×6,900 (AT/極) 回転子=拘束



エッジとの接触,あるいはウェッジ突合せ面の影響を受けて 差異がでている。実線はウェッジ中央部位置での計算値であ り,ほぼ実測値の平均的な値となっている。

次に、図11はウェッジの軸方向電流を示すものであるが、



図 9 試験中のモデル機 本機により回転子の誘導電流,磁束及び温度 上昇の分布を詳細に測定した。

0 -ポール ピッチ 図10 ティース電流の分布 同一ティースであっても、軸方向の位置に より電流値は異なっている。

大容量タービン発電機の不平衡負荷耐力 211



ウェッジの測定部位により電流値が大幅に異なっていること が指摘される。実線はウェッジ中央部位置の計算値を示すも のである。また図12にダンパ バーの電流を示す。

5 不平衡負荷耐力と大容量機への方策

以上で不平衡負荷耐力の基礎となる回転子のうず電流問題 に対する検討結果の概要を述べてきたが、これに基づき今後 の大容量タービン発電機に対する耐力許容値の限界と耐力向 上に対する方策について述べる。

5.1 短時間許容値と連続許容値

回転子の加熱耐力に対する許容値としては,短時間許容値 と連続許容値とに分けられる。短時間許容値は系統での短絡 事故の場合のように,大きな事故電流が短時間流れるときに 問題となる値であり,逆相電流 $I_2(pu)$ の二乗と事故電流の継 続時間t(s)との積 I_2^2t で表わされている。また連続許容値は, 不平衡負荷,あるいは高調波負荷をとる場合に問題となる値 であり,一般に逆相電流 I_2 で表わされている。表2に各国で 現在標準的にとっている許容値を示す。

短時間の場合と連続の場合との相違は回転子導体の温度上 昇の大小にある。すなわち,短時間の場合は大きな事故電流 に相応した電流が回転子に誘導して損失を発生するが,短時 間の現象であるため熱放散が期待できず,温度上昇の大きい ことが問題である。これに対し,連続の場合は発生損失が小 さく,冷媒への熱放散があるため,温度上昇としては短時間 の場合に比べ過酷とはならない。しかし,いずれの場合も導 体材料にとっては**表3**に示すような許容値があり,これを超 えないようにすることが必要となる。発電機容量が大きくな ると,温度的にも余裕がなくなる傾向にあるため,同表に示 した全体的な許容限界とともに回転子の各部に対しても許容 限界以下になることを見究めておくことが重要となる。

ポール ピッチー

図11 ウェッジ軸方向電流の分布 ウェッジ電流は軸方向の位置により異なっており、ティース及びダンパ バーとの接触状態の影響が現われている。



5.2 大容量機に対する不平衡耐力向上策

前述のように,不平衡負荷耐力は回転子を構成している導体の温度上昇により制限される。このため,容量が増大して 誘導電流による損失密度が大きくなっても温度を制限内に抑 える方策が必要となる。これには回転子の平均温度上昇とと もに,回転子各部に対しても十分な検討と裏付けが行なわれ ていなければならない。これに対する有効な方策として,前 章4.に述べた全長ダンパ巻線方式の採用が挙げられる。

図13は発電機容量と回転子最大温度上昇との関係を,部分 ダンパ巻線方式に対する全長ダンパ巻線方式の効果で示して いる。同図には2極機と4極機の場合を示しているが,例え ば2極機の場合でみると,容量700MVAを基準として部分ダ ンパ巻線のままで容量を増大していくと同図の破線(a)のよう

表 2 各国のタービン発電機における不平衡負荷耐力許容値 系統 の相違及び不平衡負荷耐力に対する考え方の違いにより異なっているが, アメ リカでは許容値を下げる提案が行なわれている。

短時間	$I_2^2 t^*$	10	10**	3	7	5	5
 挿 続	1.(%)	9	9 ***	10	8	5	6

43

212 日立評論 VOL. 58 No. 3 (1976-3)

に温度上昇は大きくなっていくが、これを全長ダンパ巻線と することにより、実線(b)のように温度上昇を低減することが 可能なことを示している。すなわち、今後大容量機を製作し ていく場合でも全長ダンパ巻線を採用することにより、これ までとってきた部分ダンパ巻線と同程度以上の不平衡負荷耐 力を確保できることを意味している。

表2に各国で標準的に規定している短時間許容値と連続許 容値とを示したが、これまでは発電機自身に余裕があること もあって、アメリカや我が国のように I2²t=10までを許容し ているところもある。しかし,容量の増大とともに不平衡負 荷耐力の許容限界が機械寸法を制約する条件となるようにな ってきているため、アメリカでは図14に示すように大容量機 に対する許容限界を見直す動きが具体化しており⁽²⁾,我が国 でもこれに追随する機運にある。これは容量800MVA以上か ら直線的に $I_2^2 t$ 値を下げ、1,600 MVA で $I_2^2 t = 5$ とするもの である。これには種々想定された系統事故時の逆相電流の算 定,しゃ断器の性能向上などの裏付けが行なわれたうえでの ことであるが、同時に許容値を下げることにより発電機自身 の重量低減による経済的な効果,軸間距離の短縮による軸振

回転子導体材料の温度許容値 表 3 発電機の不平衡負荷耐力の限界 は,回転子導体の温度制限から決まる。



図14 アメリカの不平衡負荷耐力許容値に関する改訂案 系統事

	加熱条件	短	時間	連	続
回転子導体	許容値	許容温度 (℃)	許容限界理由	許容温度 (°C)	許容限界理由
ウ ェ (アルミニ	ッ ジ ニウム合金)	200	高温引張強度の 低下	100	高温クリープ強 度低下
ダンパ券線	スロット部バー	"	高温強度低下	"	11.
	エンド リング	375	<u> </u>	"	"
保持リング	平 均	45	焼きばめ部締め しろ減少	45	"
体付リンク	焼きばめ部	375	ダンパ リングの 高温強度低下	100	"
軸 材 (鉄 心)	鉄心自身	425	熱応力低下 焼鈍温度以下	425	熱応力低下
	ウェッジとの 隣接部	200	ウェッジ材の高 温強度低下	100	ウェッジ,ダン パ巻線材の高温 クリープ強度低下



故時の保護方式の進歩及び寸法低減による経済的効果などより、 12t 許容値 を 下げることが提案されている。

動に関する性能改善などの波及効果が指摘されている。現状 では、全長ダンパ巻線は必ずしも広く用いられていないが、 世界的にも全長ダンパ巻線の有効性を認める気運にあり、不 平衡負荷耐力の許容限界の確保及び大容量化に対処できる効 果的な方策と考えている。

6 結 言

タービン発電機の大容量化とともに,系統事故,あるいは 不平衡負荷時の逆相電流による回転子の加熱温度上昇が発電 機寸法を直接制約する重要な要因になってきている。このた め,回転子の加熱現象に対しては、回転子の実際の導体構成 及び導体の物性値を考慮に入れた綿密な検討が必要となる。

本稿は、これの基礎となるうず電流、損失及び温度上昇に 対する解析の考え方について述べ、その結果を数値例により 一部実測結果との対比をも含めて示し、回転子の実情に即し た定量的な検討ができることを示した。また、不平衡負荷耐 力の向上策として用いられるダンパ巻線の種類と、これの効 果の比較を示し,磁極部にもバーをもつ完全全長ダンパ巻線 が極めて効果があり、今後の大容量機に対してはこれの採用 が必要なことを述べた。

参考文献

図13 発電機容量と回転子温度上昇 部分ダンパ巻線のままで容量を 増大していくと温度上昇は大きくなるが、全長ダンパ巻線とすることにより温 度上昇を低減できる。

44

- (1) N. Takahashi, T. Kawamura, M. Nishi, "Improvement of Unbalanced Current Capability of Large Turbine Generators", IEEE Trans. PA & S, Vol. PAS-94, pp. 1390-1400 (July/Aug. 1975)
- C.L.Linkinhoker, et al : "Influence of Unbalanced Cur-(2)rents on the Design and Operation of Large Turbine Generators", IEEE Trans. PA & S, Vol. PAS-92, pp. 1597-1604 (Sept./Oct. 1973)