ディスク形MHD発電システムの制動抵抗による安定化の検討

正員 早ノ瀬信彦* 正員 乾 義尚** 正員 石川 本雄***

Study of System Stabilization of Disk Type MHD Power Generation by Damping Resistor

Nobuhiko Hayanose*, Member, Yoshitaka Inui**, Member, Motoo Ishikawa***, Member

Effects of installed SDR (System Dumping Resistors) on the stability of open-cycle disk MHD generator and synchronous generator system connected in parallel to power transmission lines are numerically studied. Usually the SDR is used to absorb the output energy of synchronous generator and to get stability of the power transmission system when faults occur in the A.C. power transmission lines.

In this paper, we propose to apply the SDR in the D.C. lines between the MHD generator and the primary side of connected line-commutated inverters. We show that the SDR is effective for the system stability by a time dependent numerical analysis.

キーワード：MHD発電システム、線路事故、制動抵抗、安定化

Keywords：MHD generation system, line faults, SDR, stabilization

1. はじめに

オープンサイクルMHD発電のシステムにおいては、高熱効率を得るため、高温部にMHD発電機、低温部に蒸気タービン発電機を用いる。その際、MHD発電機は直流機であるためインバータを介して交流側に接続される。MHD発電機は負荷状態に対応して発電チャネル内の流体の状態が変化し、起電力や内部抵抗が変化するため、電力系統との接続についての検討は重要である。また、システムの安定性を検討する際には、MHD発電機と同期発電機が並列に電力系統に接続されたシステムとして解析する必要がある。

これまで、MHD発電システムの定常動作特性や事故時の特性については報告がなされているが⁽¹⁾⁽²⁾、送電線事故等の際の安定化対策やMHD発電機起動時に系統に接続する際の方策についてはほとんど報告がなされていない。

本論文では、大型のディスク形MHD発電機とベース機となるタービン発電機を電力系統に接続した複合MHD発電システムに対して、線路事故時等にシステムの安定化を図るために直流側に制動抵抗SDR (system dumping resistor)を導入することを提案している。またMHD発電機を系統に接続する際の方策としてSDRを利用することを提案している。

本論文で用いたディスク形MHD発電機は負荷開放時においても発電チャネル内の θ 方向にファラデー電流が存在する。従って、従来の同期発電機などとは異なった発電特性を有しており、安定化対策としての新たな知見が見込まれる。なお、直流機であるMHD発電機を電力系統に連系するインバータは他励式とした。

本解析では、送電線の中央部での3線地絡事故と1線地絡事故を取り扱った。事故時には、インバータは転流失敗を生じるおそれがあり、MHD発電機およびシステムは不安定な状態に陥るおそれがある⁽³⁾⁽⁴⁾。このようにシステムを安定化させるには事故回線の高速な遮断とインバータの正常動作への回復が必要であると考えられる。

前述したように、本論文では直流SDRを導入してインバータの正常動作への復旧をはかり、システムを安定化はかることを提案している。

また、解析の結果、直流SDRはMHD発電システムの安定化に有用であること、更にMHD発電機起動の際、電力系統へ接続する方策としてSDRが利用可能であることを示した。

* 神戸市立工業高等専門学校電気工学科
〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3
Dept. of Electrical Engineering, Kobe City College of Technology
8-3, Gakuenhigashi-machi, Nishi-ku, Kobe 651-2194

** 豊橋技術科学大学電気電子工学系
〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀丘1-1
Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Toyohashi
University of Technology

*** 筑波大学機能工学系
〒305-8573 つくば市天王台1-1-1
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of
Tsukuba
1-1-1, Tennou-cho, Tsukuba 305-8573

2. 解析を行うシステム

本研究では、商用規模の熱入力1000MW、総合熱効率約50%の石炭燃焼MHD発電機システムを想定している。MHD発電機は大型であるため、動作特性が安定しており、高出力が得られる2負荷の内向き流オープンサイクルディスク形とした⁽¹⁾。電気出力は235MWである。また同期発電機は出力330MVAとする。これらの発電機出力は2回線送電線を介して無限大母線に送出されるものとする。

解析を行うシステムの構成を図1に示す。システムの主要な構成要素はMHD発電機、同期発電機、直流リアクトル(DCL)、SDR、他励式インバータ、昇圧用変圧器、調相器、フィルター、2回線送電線および275kV、60Hzの無限大母線である。

インバータは他励式とし、MHD発電機の2対の出力端に直列接続する。インバータと2回線送電線の接続には、Y-Y、 Δ -Yの2組の変圧器、また同期発電機と2回線送電線の接続には、 Δ - Δ 変圧器を用いる。フィルターは、主にインバータで発生する電流ひずみ除去用の第5、第7、第11、第13高調波および高域フィルターである。調相器はインバータの無効電力補償用である。

電力システムでの事故は、的確な処置を誤ると部分的な事故から全体的な事故へと波及拡大する危険性をもっている。このような電力システムの事故波及を防止するために、本研究では直流SDRにより、システムの安定をはかろうとするものである。この方式は、原理的には、系統故障発生時に短時間定格の大容量負荷抵抗器を一時的に系統対象発電機の交流母線端に挿入し、エネルギーを吸収させることにより発電機の動揺を抑制し、系統安定度を向上させるもので、一般には制動抵抗器(SDR)本体、開閉器および投入・開放制御装置により構成される。

本研究では、直流機であるMHD発電機とインバータをシステムに含むため、図1に示すようにMHD発電機と他励式3相インバータ間に自己消弧能力を有するサイリスタスイッチと共に直流SDRを設置してシステムの安定化を図ることを提案している。またその制御による安定化の検討を行っている。SDRの実用設備としての実績は500kV、4500MW、3秒⁽²⁾などがあるので、製作上の技術的な問題は

図1 解析を行う MHD 発電システムの構成図

Fig. 1. Schematic diagram of MHD generation system.

少ないと考えられる。

解析は2回線送電線のうち1回線線路中央部での3地絡事故を想定し、SDRの投入によってMHD-同期発電システムの安定化をはかる方法について数値シミュレーションにより検討する。

なお、ディスク形MHD発電機においては、同期発電機など従来の発電機とは異なり無負荷時の端子電圧の方がむしろ負荷時の端子電圧より低くなる可能性があり、その際にはディスク形MHD発電機を電力系統へ接続する際にインバータの投入ができない恐れがある。従ってディスク形MHD発電機を電力系統へ接続する際には、あらかじめ起動用負荷を接続しておいてMHD発電機の出力電圧を増加させた後、インバータの投入を行う必要があると言える。この起動用負荷を別途用意せずに直流SDRを利用することについても検討を加える。

3. 計算条件および計算手法

〈3・1〉 オープンサイクルディスク形MHD発電機

ディスク形MHD発電機のチャンネルの形状、座標系を図2に示す。発電機内の流体諸量、電氣的諸量の振る舞いは、円筒座標系における準一次元ナビエーストックスの方程式およびマックスウエルの方程式により記述される⁽²⁾⁽⁴⁾。

大型のディスク形MHD発電機は多負荷の内向き流発電機とすることにより、定常動作特性が安定することが松尾氏らの解析⁽¹⁾により得られている。

概念設計により得られたMHD発電機は、安定な定常動作特性を有する電気出力235MW、2負荷の亜音速内向き流ディスク形である。作動流体は K_2CO_3 を1wt%シードした石炭燃焼ガスとし、その導電率、ホールパラメータ、エンタルピーなどの物性値は圧力と温度の関数として与えるものとする⁽²⁾。

発電チャンネルの基本仕様を表1に示す。壁面でのリーク

図2 インフローディスク形MHD発電機

Fig. 2. Schematic diagram of inflow disk type generator.

表1 ディスク形MHD発電機的设计条件

Table 1. Rating condition of disk type generator.

thermal input	: 1300 MW
inlet stagnation temperature	: 2700 K
inlet stagnation pressure	: 4.2 atm
inlet Mach number	: 0.9
inlet radial flow velocity	: 370 m/s
inlet swirl ratio	: 2
applied B field	: 8.5 T
channel length	: 4 m
inlet radius	: 6 m
outlet radius	: 4 m
Nozzle	: 0.2 m
Diffuser	: 0.4 m

表2 MHD発電機の定格特性

Table 2. Performances of MHD generator at steady state.

stagnation temperature	: 2700 K → 2259 K
static temperature	: 2550 K → 2195 K
stagnation pressure	: 4.2 atm → 1.0 atm
static pressure	: 2.64 atm → 0.84 atm
Mach number	: 0.90 → 0.54
swirl ratio	: 2.0 → 0.77
electrical output	: 235.3 MW
enthalpy efficiency	: 18.1%
output currents	: 9850 A (4 m ~ 6 m) : 7000 A (2 m ~ 4 m)
output voltages	: 12.0 kV (4 m ~ 6 m) : 15.3 kV (2 m ~ 4 m)

抵抗は $R_{\text{load}} = 500 \Omega$ とした。ノズルはチャネル入口から 0.2 m、ディフューザはチャネル出口から 0.4 m の部分とする。概念設計により得られた発電機の定格値を表2に示す。

発電機の時間応答特性は準一次元ナビエーストックスの方程式をマコーマック法⁽⁷⁾により解くことにより得られる。

初期条件は表2の定格値より、またディフューザ入口部の境界条件は直線外挿により、またノズル出口部の境界条件は無反射境界条件により与える。

〈3・2〉 三相同期発電機 三相同期発電機はMHD発電機後流部の熱回収ボイラーを用いた蒸気タービンにより駆動される。発電機の定格容量は330 MVA (280 MW) とする。同期発電機本体の解析には初期過渡リアクタンスまで考慮した、初期過渡リアクタンス背後電圧モデルにより扱うものとする⁽⁶⁾。また、同期発電機は自動電圧調整装置(AVR)及び調速機(GOV)をにより制御されているものとし、いずれも1次遅れ特性で模擬している⁽⁶⁾。

同期発電機の振る舞いは、これらの式を連立常微分方程式として解くものとする。本研究で用いた同期発電機、AVR

表3 同期発電機系の定数

Table 3. Rating condition of synchronous generator.

同期発電機	
$H = 4 \text{ pu}$	$D = 1 \text{ pu}$
$x_d = 1.7 \text{ pu}$	$x_q = 1.7 \text{ pu}$
$x'_d = 0.4 \text{ pu}$	$x'_q = 1.2 \text{ pu}$
$x''_d = 0.2 \text{ pu}$	$x''_q = 0.2 \text{ pu}$
$T_{d0} = 6 \text{ s}$	$T'_{q0} = 0.3 \text{ s}$
$T''_{d0} = 0.015 \text{ s}$	$T''_{q0} = 0.025 \text{ s}$
自動電圧調整装置	
$K_A = 30$	$T_A = 0.1 \text{ s}$
調速機	
$K_G = 20$	$T_G = 2 \text{ s}$

表4 電力回路網の計算条件

Table 4. Rating condition of power transmission circuit.

line impedance	: $0.01 + j0.1 (\text{pu})$
transformers for inverters	: $0.007 + j0.15 (\text{pu})$
Transformer for compensator	: $0.007 + j0.1 (\text{pu})$
compensator	: $Q=50, \omega L=1/\omega C \times 0.06$
filters	: 5th, 7th, 11th, 13th ($Q=50$) : high pass ($Q=3$)
d.c. reactance	: 350 mH (upper stream) : 300 mH (down stream)

および GOV の各定数の値を表3に示す。ただし、 H : 単位慣性定数、 D : 制動定数、 x_d および x_q : 直軸および横軸同期リアクタンス、 x'_d および x'_q : 直軸および横軸過渡リアクタンス、 x''_d および x''_q : 直軸および横軸初期過渡リアクタンス、 T_{d0} および T'_{q0} : 直軸および横軸の過渡開閉時定数、 T''_{d0} および T''_{q0} : 直軸および横軸の初期過渡開閉時定数、 K_A および K_G : AVR および GOV のゲイン、 T_A および T_G : AVR および GOV の時定数である。

〈3・3〉 電力回路網 図1に示したシステムにおいてMHD発電機および同期発電機を除いた電力回路網の時間応答解析には、Bergeronの手法を用いている⁽²⁾⁽⁴⁾。回路網を構成するL-R-Cの各インピーダンス枝の電圧、電流を求めるため、接点電位と枝電流の関係式、つまりオームの式を台形近似により等価電流源と等価抵抗により表した等価回路に置き換え、節点電位を未知数とした連立方程式により解くものである。

表4に電力回路網を構成する各要素の数値条件を示す。電力系統側の線間電圧は275 kVとする。なお、インバータを構成するサイリスタは抵抗で模擬し、オン時には低抵抗、オフ時には高抵抗で模擬する。

全システムの解析においては、MHD発電機、同期発電機、回路網間の相互作用を考慮して、CLF条件⁽⁷⁾を満たす $\delta t = 10.85 \mu\text{s}$ の時間ステップ毎にそれぞれの接続部の電圧または電流を与えて前述した方式により解き、非定常シミュレーションを行うものとする。これにより、計算時間の短縮化をはかっている。

4. 解析結果

〈4・1〉 事故時の動作特性およびSDRの効果 解析は、システムの定常状態において2回線送電線のうちの1回線の中央部での3線地絡事故および1線地絡事故を想定し、システムの安定性に対するSDRの効果、システム動作特性について行った。

SDR装置には電流の連続性が保たれるように2組のスイッチを設けている。インバータを遮断する際にはSDRを投入後、インバータ遮断の操作を行う。またインバータの再投入時にはインバータ投入後、SDRの遮断を行うようにしている。なお、SDRの抵抗値はインバータの遮断、再投入動作においてMHD発電機内結量の変動ができるだけ小さくなるように、定常負荷抵抗に近い値を選定している。

事故時の事故回線の遮断は事故検出及び遮断器の動作遅れ時間を考慮して定常運転中に事故が発生後、5サイクル(83.4[ms])で行うものとする。またSDRの投入及びインバータの遮断については、上流側、下流側それぞれのMHD発電機の実出力電流が定常運転時の125%以上の値で事故と判定するものとした。この場合、事故の検出遅れ時間と制動抵抗用開閉器の投入遅れ時間を考慮し、事故検出からSDRが投入までの遅れ時間を90[ms]とした。

また、事故解析における事故時間などの設定は以下のようになっている。定常状態から時間 $t=40$ [ms]において事故が発生するものとし、①事故発生($t=40$ [ms])→②事故回線遮断($t=123.4$ [ms])→③SDR投入→④インバータ遮断→⑤インバータ再投入($t=300$ [ms])→⑥SDR遮断→⑦事故回線の再投入($t=310$ [ms])→⑧定常状態とした。なお、⑤、⑦の再投入時間はMHD発電機などの応答時間に対し、充分余裕時間を持った設定とした。

3相短絡事故の解析は以下の4つのケースについて行った。

- (1) SDRの投入も事故回線の遮断も行わない場合
- (2) 事故回線のみ遮断を行った場合
- (3) SDRの投入および事故回線の遮断までを行った場合
- (4) SDRの投入から事故回線の再投入までを行った場合

解析の結果、ケース(1)と(2)、またケース(3)と(4)はほぼ同じ特性が得られたので、ケース(2)と(4)の結果を以下に示す。

図3はケース(2)のSDRの投入後、事故回路の遮断のみを5サイクル時に行った場合の過渡特性を示す。事故発生後、インバータは転流失敗を生じて短絡状態に陥るため、MHD発電機出力電流は、定常時の上流側 $I=10000$ A、下流側 $I=7000$ Aから共に急変している。MHD発電機内の r 方向ガス流速もそれに伴い、大きく変動しており、時間の経過と共に不安定な状態に陥っている。このため、他のMHD発電機内各諸量も不安定な状態となる。また、同期発電機の回転子角速度と出力電力は振動状態となり、脱調の可能性を示しているつまり、解析結果は、システムが

不安定となることを示しており、事故時に事故回線を遮断するだけではシステムは安定しないことを示した。

図4はケース(4)のSDRを投入から事故回線の再投入ま

(a) 同期発電機回転子の角速度 ω/ω_0

(b) 同期発電機出力電力

(c) MHD発電機出力電流

(d) r 方向ガス流速

図3 事故回線の遮断のみを行った場合の特性

Fig. 3. Variations when the circuit breaker is operated after the 3-phase short-circuit fault in the transmission line.

で行った場合の特性を示す。MHD発電機出力電流、 r 方向ガス流速、同期発電機回転子の角速度、出力電力いずれの諸量も事故直後急変するが、SDRの投入によってその変動は急速に減少し、安定な状態へ減衰している。また、インバータの再投入によってMHD発電機は系統に接続され、事故前の安定な定常状態に回復している。また、ケース(2)に比べての諸量変動幅も小さく安定している。つまり、SDRの投入によってシステムが安定状態に回復すること、また、インバータの再投入による定常状態への復帰も可能であることが分かる。ちなみに、事故発生後からインバータ遮断までが約130.5[ms]、またインバータの再投入を事故後260[ms]としたので、SDRの投入時間は約130[ms]間(7.8サイクル)である。

図5は1線地絡事故時のMHD発電機の r 方向ガス流速、同期発電機の回転子角速度の特性を示す。図4に示した3相短絡事故の場合とほぼ同様な特性を示しており、SDRの効果により定常状態へ復旧することを示している。ただし、事故時の変動幅は3線地絡事故の場合に比べて幾分小さく、1線地絡事故の影響も幾分小さいと言える。

〈4・2〉 MHD発電機の系統への接続方法についての考察
他励式インバータが動作するためには、直流側電圧の方が交流側電圧の直流側換算電圧値より大きいことが条件である。しかしながら、ディスク形MHD発電機の起電圧は無負荷時に必ずしも高いとは言えないため、系統へ連系するためには工夫が必要となる。

ディスク形MHD発電機チャンネル内のファラデー電流密度 J_θ およびホール電界 E_r は次式で与えられる⁽²⁾。

$$J_\theta = \frac{BI}{A} - \sigma u_r B$$

$$E_r = \frac{(1 + \beta^2)}{\sigma A} I - (s + \beta) u_r B$$

ただし、 A は発電チャンネル断面積、 B は印加磁束密度、 I は出力電流、 u_r は r 方向ガス流速、 $s (= u_\theta / u_r)$ はスワール比、 σ はガスの導電率、 β はホールパラメータである。

上記式から明らかなようにMHD発電機出力電流 I が小さくなるとファラデー電流密度 $|J_\theta|$ が大きくなる。このため、ガス流速 u_r は r 方向のローレンツ力 $|J_\theta B|$ の増加により減速され、ホール電界 E_r の右辺第2項の起電力の r 方向積分値であるMHD発電機の起電圧 V_0 が低下することになる。このことは図3(c),(d)の I と u_r の特性において、上流部では I の増加に伴い u_r が加速され、下流部の I の減少で u_r が減速していることから明らかである。

従って、ディスク形MHD発電機は定常時より無負荷時の方が V_0 が低いいためインバータの投入ができず、系統への連系ができない恐れがある。一方、 I が増加すると V_0 が高くなるため、インバータの投入・起動が可能となる。

従って、MHD発電機を電力系統へ接続するには、予め起動用抵抗を用いて適当な出力電流 I を流した状態からインバータを投入すれば、発電機内諸量の変動も少なく、接

(a) 同期発電機回転子の角速度 ω/ω_0

(b) 同期発電機出力電力

(c) MHD発電機出力電流

(d) r 方向ガス流速

図4 SDRを投入し事故回線の再投入まで行った場合の特性(3線地絡)

Fig. 4. Variations when the SDR and the circuit breaker in the faulted line are operated after the 3-phase grounding fault. Then the inverter system is re-operated and the faulted line is re-connected.

(a) 同期発電機回転子の角速度 ω/ω_0

(d) r 方向ガス流速

図5 1線地絡事故時のSDRを投入し事故回線の再投入までを行った場合の特性

Fig. 5. Variations when the SDR and the circuit breaker in the faulted line are operated after the one-phase grounding fault. Then the inverter system is re-operated and the faulted line is re-connected.

続が可能となると考えられる。

図4および図5に示した定常状態への復旧において、SDRが投入された状態からインバータへ切り替え・再投入するスキームは、MHD発電機を電力系統へ接続する際のスキームに同じであると考えてよい。従って、SDRをそのような起動用抵抗に代用することが可能であり、有用と言える。

5. まとめ

3線地絡のような線路事故時には事故回線の遮断のみではMHD同期発電システムは安定状態に回復しないため、SDRの投入によってシステムの安定化をはかる提案をした。線路での最大故障と思われる送電線路の3線地絡事故および1線地絡事故を想定したMHD同期発電システムの安定性についての解析の結果、直流SDRはシステムの安定化に有効であることを示した。また、直流SDRはMHD発電機を電力系統へ連系するための起動用抵抗としても有用であることを示した。

終わりに、本研究を進めるにあたり、数値計算などに助力頂いた神戸高専専攻科電気電子専攻の瀬尾大介君（平成14年3月修了）に感謝の意を表します。

（平成14年3月4日受付，平成14年4月30日再受付）

文 献

- (1) T. Matsuo, et al.: "Stability Analysis of Open-Cycle Subsonic Disk MHD Generator", *T. IEE Japan*, Vol. 116-B, No.3, pp.360-366(1996-3) (in Japanese)
松尾, 他:「オープンサイクル亜音速ディスク形MHD発電機の安定性解析」, 電学論B, 116, 3, pp.360-366 (1996-3)
- (2) N. Hayanose, et al.: "Behavior of Two-Pair-Loads Open-Cycle Disk Generator Connected to Power Transmission System", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.7, pp.1061-1068 (1997-7) (in Japanese)
早ノ瀬, 他:「2負荷オープンサイクルディスク形MHD発電機の送電系統連系時の動作特性」, 電学論B, 117, 7, pp.1061-1068 (1997-7)
- (3) Inoue, et. al.: "A Study of Stable Control of MHD Generator Connected to Power Transmission System", '99 北大エネルギー先端工学シンポジウム論文集, pp. 101-110 (1999)
- (4) 早ノ瀬, 他:「SDRによるMHD発電機・送電系統の安定性対策」, 電学会新エネルギー・環境研究会資料, FTE-98-12, pp.13-17 (1998)
- (5) 電気共同研究会:「電力系統の安定度」, 電気共同研究, 34, No.5 (1979)
- (6) Inui, et al.: "Operation and Control of Coupled Nonequilibrium Disk MHD Generator and Inverter System under Power Line Fault Condition", *T. IEE Japan*, Vol. 118-B, No.2, pp.148-156 (1998-2) (in Japanese)
乾, 他:「非平衡ディスク形MHD発電機・インバータシステムの系統故障時の運転・制御」, 電学論B, 118, 2, pp.148-156 (1998-2)
- (7) R. W. MacCormack: "The Effect of Viscosity in Hypervelocity Impact Cratering", AIAA Conf., Paper No. 69-354 (1969)

早ノ瀬 信彦

（正員）1944年3月4日生。1976年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月神戸高専講師。助教授を経て、1991年同教授となり現在に至る。工学博士。主として、MHD発電、放電・サージ現象解析の研究に従事。

乾 義尚

（正員）1959年3月31日生。1983年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。京都大学工学部電気工学科助手を経て、1992年同講師。1996年豊橋技術科学大学電気電子工学科助教授となり現在に至る。工学博士。エネルギー変換、MHD発電、燃料電池に関する研究に従事。エネルギー資源学会会員。

石川 本雄

（正員）1949年1月12日生。1976年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。京都大学エネルギー研究所助手を経て、1984年京都大学工学部電気工学科助教授。93年筑波大学構造系教授、現在に至る。工学博士。エネルギー変換、MHD発電に関する研究に従事。日本原子力学会、プラズマ・核融合学会、エネルギー・資源学会会員。