電力信号フィードバック直列補償器を用いた 発電機軸ねじれ共振現象の抑制

武田 雅之* 伊与田 功*
伊藤 義道*

Suppression of Subsynchronous Torsional Interaction Using series compensation Equipment with power signal feedback

Masayuki Takeda*, Isao Iyoda*, Yoshimichi Ito*

Abstract – Suppression of subsynchronous torsional interaction(SSTI) in electrical power system achieved with insertion of an inverter to transmission line in series. Active power of the transmission line is sensed and filtered by three sets of bandpass filters to get the torsional signal for feedback. The output signal of controller is converted to voltage reference signals for each phase by dq inverse transformation and the voltage reference signals are input to PWM control circuit to generate the gate firing signals for the inserted inverter. Simulation results show the control is effective to suppress the SSTI

キーワード : 軸ねじれ、SSTI 直列補償、インバータ

Keywords : Subsynchronous Torsional Interaction ,Series Compensation , Inverter

1. はじめに

電力系統において軸ねじれ振動の存在は、昔から知られており[1][2]、その振動が発生した時に、電気的に抑制する方法もいくつか報告されているが[3][4]直列にインバータを挿入した事例はない。本研究では、送電線に最近性能が向上しているインバータを直列に挿入し、送電電力より軸ねじれ振動成分を検出し、そこから振動の抑制信号を作成しインバータ出力電圧を制御することによって、軸ねじれ振動を抑制することを行った。

2. シミュレーションモデル 1

図1に基本検討で用いたシミュレーションモデル系統を示す。

図1 シミュレーションモデル概略図

Fig1 Schematic simulation model

タービンと発電機が軸で接続されていて、発電機は、送電線によって母線と接続されている状態で(送電線の値は、抵抗成分 0.05(pu)リアクトル成分は 0.5(pu)コンデンサ成分は、直列コンデンサ補償の割合によって変更した。)インバータは、発電機と送電線の間に直列に挿入されている(単相インバータを三相それぞれ一つずつ挿入している)。系統の電力を測定し、バンドパスフィルタ三段[5]によって振動成分のみを取り出した後、フィードバック制御ブロックによって調整を行い、dq 逆変換を行って三相にもどして、挿入した各相のインバータの指令信号として入力した。図2にインバータの一相分を示す。インバータの電源は直流電圧源を使用した。(直流電圧源の電圧は、モデルによって変更した。)

図2 インバータモデル概略図(一相分)

Fig2 Schematic inverter model

3. シミュレーション結果 1

3-1 フィードバック制御無しの場合の軸ねじれ特性

* 大阪電気通信大学
〒572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8
Osaka Electro Communication University
18-8 hatsu-cho, Neyagawa, Osaka, Japan 572-8530

図 3 に発電機の軸のねじれ角の変化を示す。

図 3 軸の位相差

Fig3 The phase difference between the axis

軸ねじれ振動(12Hz)が時間が経過しても減衰せずにはほぼ一定の振動波形で、その上に約 1Hz 程度の低い周波数成分により、波形全体が緩やかに振動している結果になった。

3-2 軸ねじれ振動抑制制御とその効果

直列コンデンサ補償無しの場合のフィードバック制御ブロックを図 4 に示す。

図 4 フィードバック制御ブロック

Fig4 Feedback control block

電力の振動成分を FFT 解析した結果、振動成分である 12Hz が最も大きい。12Hz 以外の振動成分が多数含まれている。含まれている割合が多かった 30Hz までの振動成分を制御するため、時定数 0.7 s (カットオフ周波数 0.22Hz) のハイパスフィルタ三段と時定数 0.01 s (カットオフ周波数 15.9Hz),

0.0075 (カットオフ周波数 31Hz) のローパスフィルタで制御用ブロックを構成した。フィルタのゲインについては、最も効果的になるように調整を行って決定した。抑制後結果は、図 5 に示すような結果になった。図 3 の結果と比較すると振動直後は、 $\pm 0.07(\text{rad})$ 程度であったが振動が 9 秒後では、 $0.01(\text{rad})$ 程度に減衰している結果が得られた。この結果より、直列に接続したインバータの電圧制御による方法が軸ねじれ振動の抑制に効果があることが確認できた。直列コンデンサ補償 60% の場合の抑制では、補償 0% の時のゲインでは発散したのでゲインを下げた。系統の状態によってゲインを調整する必要があることがわかった。

図 5 軸の位相差(直列コンデンサ補償無し)

Fig5 The phase difference between the axis
(None series capacitor compensation)

3-3 インバータの出力電圧信号の分析

電圧源ブロックで得られた抑制信号の結果を参考にして、単相インバータの直流側の電圧を少し余裕を持たせて 65(V) に設定した。しかし 65(V) は抑制信号の最も大きい値の所であって、図 7 のように時間が経てくると $\pm 2(\text{V})$ ぐらいの値になり振動開始 1 (s) でも、 $\pm 10(\text{V})$ 以内まで減衰するということがわかった。インバータの容量は発電機定格の 8.7% の容量であった。図 6 にインバータの出力電圧信号 (U 相) の拡大図、図 7 にインバータの出力電圧信号 (U 相) を 300Hz のローパスフィルタを通した波形の拡大図をそれぞれ示す。

図 6 インバータの出力電圧(U 相)

Fig6 Output voltage to the inverter (U-phase)

図 7 インバータの出力電圧(300Hz のフィルタ通過後)

Fig7 Output voltage to the inverter
(After the filter pass of 300Hz)

3-3 作成された軸ねじれ振動抑制信号の周波数構成

図 9 に単相インバータに入力する軸ねじれ振動の抑制信号の拡大図、図 10 にインバータの入力信号を FFT 解析した結果をそれぞれ示す。図 11 にインバータの出力電圧信号の FFT 解析結果を示す。軸ねじれ振動として図 8 のように 12Hz の振動が発生している過程でシミュレーションを行っているのでインバータの入力信号も、その付近の振動成分が最も多いのかと思われたが、系統の基本周波数 60Hz の $\pm 12\text{Hz}$ の振動成分がほとんどであることがわかった。(この値は 60Hz の基本周波数を 100% とした値で 7000%) FFT 解析を行った期間は、6(s)~8(s) である。インバータの出力電圧も同様に基本周波数を 100% としている。

図 8 フィードバック制御ブロック
通過前の信号の FFT 解析結果

Fig 8 FFT analysis result of the feedback control block
before passing through signal

図 9 インバータへの入力信号の拡大図(U 相)

Fig9 Enlarged view of the input signal to the inverter (U-phase)

図 10 インバータへの入力信号 FFT 解析結果

Fig10 FFT analysis result of the input signal to the inverter

図 11 インバータの出力電圧(U 相)の FFT 解析結果

Fig11 FFT analysis results of the inverter output voltage (U-phase)

3-5 発電機出力の変更

3-3 までのシミュレーション結果は、発電機の容量が 10KVA であるのに対して、1000W 程度しか出力が出ていない問題があったので、出力を変更しその時においても抑制を行った。出力を変更するためにモデルに追加した部分を図 12 に示す。

図 12 タービントルク変更のための追加部分

Fig12 Additional portion for the turbine torque change

モデルのタービン軸の部分に出力変更のために図 12 のようなブロックを追加した。このブロックを追加することによってタービントルクを増加させ出力を変更した。図 13 にタービントルク変更後の出力電力波形を示す。

図 13 出力電力波形

Fig13 Output power Waveform

タービントルクを増加させることによって電力を増加させたが、6000W 以上出力電力を増加させることができなかった。これ以上増加させようとすると出力電力の波形が大きく乱れた。

図 14 抑制前の軸の位相差

Fig14 The phase difference between the axis of the previous suppression

出力変更後の抑制前の軸の位相差は、図 3 の出力変更前の軸の位相差とほぼ変わらない結果であった。

3-6 発電機出力による影響

出力変更前と同様に、インバータにおいて抑制信号の接続を行った。抑制に用いたフィードバック制御ブロックを図 15 に示す。

図 15 フィードバック制御ブロック

(出力増加後インバータによる抑制信号接続)

Fig15 Feedback control block

(The suppression signal connection by the inverter after the output amplifier)

フィードバック制御ブロックは出力変化前のものと同様のものを使用した。このフィードバック制御ブロックによる抑制結果を図 16 に示す。

図 16 抑制後の軸の位相差

Fig16 Phase difference of the axis after the suppression
抑制前は、9 秒後まで ± 0.1 程度振動していたが、抑制後の結果、電圧源ブロックの場合と同様に幅 0.01 程度まで減衰していた。

続いて出力を 6000W と 1000W の間の値に変化させたときの抑制結果を示す。

(出力 5000W)
(Output 5000W)

(出力 4000W)
(Output 4000W)

(出力 3000W)
(Output 3000W)

(出力 2000W)
(Output 2000W)

図 17 出力 5000W～2000W の場合の抑制結果
Fig17 Suppression results in the case of output 2000~5000W

抑制に用いたフィードバック制御ブロックは、図 15 と同じ時定数のゲインのものを使った。抑制結果は、出力 5000W と出力 4000W は少し波形に乱れが生じているが、軸ねじれ振動はしっかり減衰していた。この結果より、出力を変化させても同じ時定数と同じゲインのフィードバック制御ブロックを用いて抑制できることが確認できました。

4. シミュレーションモデル 2

(IEEE の second benchmark model への応用)

IEEE が軸ねじれの解析用に提供している Second benchmark model を用いてシミュレーションを実施した。このモデルを用いた理由は、今回考案した抑制手法が実際に近いモデルでも有効であるのかを検証するためである。シミュレーションモデルの概略図を図 18 に示す。送電線のパラメータの値を図 19 に示す。

図 18 シミュレーションモデル概略図 2

Fig 18 Schematic simulation model 2

図 19 送電線のパラメータ

Fig19 Parameters of the transmission line

タービンと発電機が軸で接続されていて発電機は変圧器と送電線を介して母線と接続されている状態で(直列コンデンサ補償は、このモデルでは、55%補償に設定されている。)

4-1 フィードバック制御無しの場合の特性

図 20 にフィードバック制御による抑制を行わない場合の結果を示す。

図 20 低圧・高圧タービン間のトルク(抑制前)

Fig20 Torque between the low pressure and high pressure turbine (Suppression before)

フィードバック制御による抑制を行わない場合は、直列コンデンサ補償による軸ねじれ共振現象によってトルクが急激に増幅する現象が確認できた。振動発生直後 4(pu)程度まで振動が大きくなり、10 秒後では、±30(pu)程度まで発散する結果が得られた。

4-2 軸ねじれ振動抑制用のフィードバック制御ブロックの電圧源ブロックによる接続の検討

抑制手法の効果を確かめるためインバータではなく制御電圧源ブロックを用いて検討した。この IEEE のモデルの場合に使用したフィードバック制御ブロックを図 21 に示す。図 22 に電力振動検出用バンドパスフィルタを示す。図 23 に調整用ハイパスフィルタを示す。

図 21 フィードバック制御ブロック 2

Fig21 Feedback control block

図 22 電力振動検出用バンドパスフィルタ

Band-pass filter for the power vibration detection

図 23 調整用ハイパスフィルタ

Fig23 The adjustment for the high-pass filter

このモデルの軸ねじれ振動の振動周波数は、25Hz であり、今までの独自に作成したモデルの振動周波数の 2 倍であったので図 21 のフィードバック制御ブロックの時定数は、前のケースの約半分の値に設定した。図 22 の電力振動検出用バンドパスフィルタは、軸ねじれ振動の振動周波数が 25Hz であるので、時定数 0.00796(カットオフ周波数 20Hz)のハイパスフィルタを三段と時定数 0.005305(カットオフ周波数 30Hz)のローパスフィルタを三段で検出用ブロックを構成した。前のケースと異なっているのは、調整用ハイパスフィルタ(時定数 0.00318 カットオフ周波数 50Hz)を三相それ

ぞれ一つずつ入れている点である。カットオフ周波数を 50Hz にしている理由は、軸ねじれ振動検出用バンドパスフィルタとフィードバック制御ブロックを通った後の信号に含まれている周波数成分を FFT 解析すると系統の基本周波数 60Hz の±25Hz の振動周波数の信号であり、片一方の周波数成分のみを切り出して抑制を行ってみたいために挿入した。

これらのフィルタを用いて抑制した結果を図 25 に示す。

図 24 低圧・高圧タービン間のトルク(抑制後)

Fig24 Torque between the low pressure and high pressure turbine (After the suppression)

抑制前では、振動発生直後では 4(pu)程度であったのが、抑制後では、2(pu)程度に抑えられていて、9 秒後では、±0.1 程度まで減衰することが確認できた。

4-3 インバータによる抑制信号の接続への変更

抑制信号をインバータによって接続する場合に用いたフィードバック制御ブロックを図 25 に示す。

図 25 フィードバック制御ブロック

(インバータによる接続時)

Fig25 Feedback control block

(And when connecting the suppression signal by the inverter)

抑制信号をインバータによって接続する場合は、電圧源ブロックによって抑制信号を接続する場合に比べて抑制力が弱くなってしまうので、ゲインを少し大きくした。抑制信号を電圧源ブロックによって接続した場合の抑制信号の大きさは、22000V の系統に最大 15000V もの信号を加えていた。しかし抑制信号の最大値は 15000V であったが、1 秒後には 1000V 以下にまで減衰していたので、±1500V のリミッターをインバータの手前に挿入して抑制信号の最大値を一定にしインバータのスイッチングが継続するようにした。

図 26 リミッターブロック

Fig26 Limiter block

抑制信号をインバータによって接続し抑制を行った結果を図 27 に示す。

図 27 低圧・高圧タービン間のトルク(抑制後)

Fig27 Torque between the low pressure and high pressure turbine
(After the suppression)

抑制信号をインバータを用いて接続すると電圧源ブロックの場合を比べて抑制力が小さくなり、その上リミッターを挿入しているため、電圧源ブロックによる場合より抑制結果は悪くなった。値は、振動開始直後は 4(pu)程度振動していたが、10 秒後では、0.3(pu)程度まで減衰していた。

4-4 作成された軸ねじれ振動の抑制信号の 周波数構成と大きさ

3 章で説明した独自に作成したモデルの場合と同様にフィルタなどによって作成された抑制信号について検討した。
インバータへの入力信号を図 28 に示す。

図 28 インバータへの入力信号

Fig28 The input signal to the inverter (U-phase)

インバータに入力された電圧指令信号に含まれている周波数成分を FFT 解析した結果を図 29 に示す。

図 29 インバータへの入力信号の FFT 解析結果

FFT analysis result of the input
signal to the inverter

作成された抑制信号は、系統の基本周波数 60Hz の±25Hz の値になっていて、調整用のハイパスフィルタが入っている

ため-25Hz の周波数成分の方が小さくなっている。その上基本周波数 60Hz の±13.5Hz の振動成分も入っている。独自に作成したモデルの場合と同様にインバータの出力電圧に 300Hz のローパスフィルタを通した結果を図 30 に示す。

図 30 インバータの出力電圧(300Hz のフィルタ通過後)

Fig30 Output voltage to the inverter
(After the filter pass of 300Hz)

インバータの出力電圧は、インバータの直流電圧源を 1500V に設定しているのに最大値が 1500V にとどいておらず、約 1450V ぐらいの値になっていた。

5. まとめ

本研究室で作成した軸ねじれ振動のモデルを用いて、直列インバータで軸ねじれを抑制できることを確認した。またこのモデルの出力を変更した時にも、同一の時定数、同一のゲインのフィルタを用いて抑制できることが確認できた。さらに、IEEE の second benchmark model に今回考案した手法を適用しこの場合も軸ねじれ振動の抑制効果を確認できた。

文 献

- [1] 交直連携系統における振動現象とその安定化制御に関する研究 高崎 昌洋 電力中央研究所・総合報告 T23 平成 4 年 1 月
- [2] 直列コンデンサ補償系統における同期発電機の軸ねじれ共振現象の解析 小竹 敏雄 電気学会論文誌 B 99 巻 7 号 昭和 54 年 7 月 P 473~480
- [3] ダイナミックコンペンセイタによる SSR 現象の抑制 小竹 敏雄、電気学会論文誌 B 100 巻 9 号 昭和 55 年 9 月 P 517~524
- [4] タービン発電機の軸ねじれ振動抑制装置による SSR の抑制 一原 嘉昭、電気学会論文誌 B 101 巻 4 号 昭和 56 年 4 月 P 213~220
- [5] 電力フィードバックを用いた発電機軸ねじれ振動の電氣的抑制 武田 雅之 大阪電気通信大学 工学部電気電子工学科 卒業論文 平成 27 年度 2 月 25 日
- [6] Second benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance ieee transaction on power apparatus and systems , vol . pas-104, no.5, may 1985.

【質 疑】

三菱電機 先端技術総合研究所・森 修氏

【質問 1】 直列補償を選んだ理由は？

【回答 1】 直列補償の方がインバータ容量を低減できると考えたためである。

【質問 2】 補償に必要な容量は？

【回答 2】 今までの検討結果では、10%程度の容量があれば、定格トルクの数倍のトルク変動まで対応できる。

【質問 3】 並列との比較はされていますか？

【回答 3】 現在の所は行っていないが、並列では常に定各電圧が追加され、かつ注入電流は、発電機側と系統側に分流することになるが、直列ではそのような問題が無いので、小さくなると考えている。

【質問 4】 直列回路部の構成は？

【回答 4】 現在の所は直流電圧源を用いて構成している。将来的には、UPFC 的な構成や、STATCOM と同じようにキャパシタだけで対応できるか検討していきたい。

【質問 5】 有効電力 or 無効電力のやり取りはあるか？

【回答 5】 現在のところ、検討していない。

大阪大学・三浦 友史氏

【質問 1】 どのようなコンセプトで共振を抑制するのでしょうか？ たとえば、インバータに有効電力を授受することによって振動をダンピングさせるのでしょうか？あるいは仮想的にインピーダンスを変化させてダンピングさせるのでしょうか？

【回答 1】 発電機と無限大母線の間の送電線に新たに電圧源を挿入することで、発電機電機子電流を変化させ、その変化で発電機トルクを変化させ抑制する。有効電力を消費してダンピングさせるのではなく、適切な位相でトルクを発生させることでダンピングを効かせている。

川崎重工業(株)・崎元 謙一氏

【質問 1】 パワーエレクトロニクス機器(直流送電、UPS)と発電機が並列運転した時に、軸ねじれ共振現象が発生することがあるが、提案方式は対応可能か？

【回答 1】 発生事象の周波数にもよるが、通常の 10~20Hz の軸ねじれ振動現象であれば対応可能と考えている。

【質問 2】 軸系(タービン・発電機)の共振周波数から抑制に用いるフィルタの時定数(カットオフ周波数)を設計できるか？

【回答 2】 現在のところ共振周波数からフィルタの時定数を決め、試行錯誤でチューニングしている。詳しい設計手法は今後の検討において明らかにできればと考えている。

同志社大学・井上 馨氏

【質問 1】 フィルタを用いて振動を取り出し、制御に用いられるますが、その位相について検討しておられるのでしょうか？

【回答 1】 位相が重要であることは認識しているが、現在の段階では、抑制効果と位相の関係についても詳しくは、わかっておらず、今後の検討で明らかにしたいと考えている。