博士論文

風力発電による電力系統の
周波数変動特性に関する研究

A Study on the Power System Frequency Fluctuation

due to Wind Power Generation

平成 26 年 3 月

刘　俊俏

Liu　Junqiao

まえがき

近年、地球温暖化や化石燃料の枯渇の問題は年々深刻さを増している。平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災及び東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて、日本のエネルギー政策の見直しが行われており、今後の日本のエネルギー供給を支えるエネルギー源として、新エネルギーへの期待が高まっている。そのため、再生可能なクリーンエネルギーとして、自然エネルギーが注目を集めている。風力発電は、風の力(風力)によって発電機を回して発電する方式であり、再生可能エネルギー利用の 1 つの形である。地球環境の保全、エネルギーセキュリティの確保、経済成長の維持を同時に実現可能なエネルギー源として、世界各地で普及が進んでいる。そこで、第 1 章では風力発電の基礎について説明する。

政府目標に掲げられる大規模な新エネルギーの導入を実現するためには、低コスト化、系統安定化対策、立地制約、信頼性向上など様々な技術的課題があり、これらを確実に克服していくことが必要となっている。特に、風力発電の大規模な導入を進める上では、低コスト化、環境アセスメント対応、出力安定化等様々な技術的課題を克服することが必要となっている。

風力発電は技術革新による発電機大型化により設置コストの低減、発電効率の良さ、導入補助などの後押しを受け、急速に拡大している。世界風力エネルギー会議(Global Wind Energy Council：GWEC)の 2013 年発行の Global Wind 2012 Report によると、世界の風力発電総設備容量は、前年の 238,050MW から 282,587MW に達し、2011 年比で 18.7%の増加になった。毎年、前年比 20～30%超の伸び率を示し、順調に増加している。

しかし、風力発電は風況により出力が変動し、導入量の増大とともに連系する電力系統に周波数変動や電圧変動などの悪影響を与えることが懸念されている。特に、周波数変動の問題は、負荷が軽くなり電力系統の調整能力が小さくなる深夜に顕著である。

このような背景から一部の電力会社では風力発電機の導入に制限を設けており、さらなる大規模な導入はあまり進んでいない。そこで、現在の系統に導入可能な風力発電の容量の解析、検討が重要となってくる。このような背景の下、第 2 章でウインドファームによる系統の周波数変動の解析を行う。

風力発電の導入増加に伴う電力系統の品質(特に周波数)維持のためには、出力変動対策が欠くことのできない重要な課題となっている。現在、その対策として風力発電機に蓄電池や超電導エネルギー貯蔵装置(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)、電気二重層キャパシタ(Electric double-layer capacitor, EDLC)、フライホイ

ール等の電力貯蔵装置を併設することが検討されている。しかし、これらは手法的には有効であるが、電力貯蔵装置設置に伴うコスト負担、低応答速度、寿命が短いなどの問題が大きいため、中々普及が進んでいないのが現状である。

そこで、第 3 章で現実の電力系統を模擬して複数の風力発電機から成るウインドファームと同期発電機、負荷から成る系統モデルを構築し、ガバナフリー運転や負荷周波数制御(Load Frequency Control, LFC)等の系統側の周波数調整能力も考慮し、固定速風力発電機出力を平滑化する方法として風車の指数移動平均(Exponential Moving Average, EMA)ピッチ制御を用いる出力変動対策に関する検討結果を示す。

EMA ピッチ制御系では、風力発電機容量が系統容量に比較して 10%程度と大きく、かつ厳しい条件である軽負荷の場合でも周波数変動が許容範囲内に収まり、出力変動の平滑化が有効に動作することを確認した。しかし、高風速の場合には周波数変動が大きくなった。そこで、第 4 章で更に周波数変動を抑制するための新しいピッチ制御系（Low-pass filter (LPF) 制御系）を提案する。ここでは、ウインドファーム容量と負荷容量の条件を変えることにより周波数にどのような影響を与えるかを電力系統解析ソフト PSCAD/EMTDC を用いて検討する。

第 5 章では、新しい大規模のモデル系統を用いて、第 4 章で提案したピッチ制御系よりも更に周波数変動を抑制するため、系統電力出力目標値の決定方法を検討し、系統周波数偏差に対応して電力出力目標値を増加、減少できるような新ピッチ制御系ドループ制御(Droop)を提案し、系統解析ソフト PSCAD/EMTDC を用いてその有効性を検討する。

現在の市場では、およそ二つのタイプの風力発電機を導入している。風力タービンは、固定速度または可変速度で動作させることができる。固定速度で運転されるかご型誘導発電機(Induction Generator, IG)は構造が簡単な為に非常に丈夫、価格が安いなどの利点を有するが、電力品質制御の点で可変速機に比べて劣っている。永久磁石式同期発電機(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)は可変速風力発電機として、固定速機よりも優れた性能を有している。PMSG がフルコンバータを用いて電力系統に接続されているため、系統側の有効、無効電力を独立に制御することができ、系統の周波数制御にも寄与できる。したがって第 6 章では PMSG による系統の周波数制御を電力系統解析ソフト PSCAD/EMTDC を用いて検討する。

目次

まえがき----------(1)
第 1 章　風力発電について
(1-1)　再生可能エネルギーの必要性----------(6)
1-1-1　地球環境問題----------(6)
1-1-2　化石燃料の枯渇----------(9)
(1-2)　風力発電とは----------(10)
(1-3)　風力発電の長所と短所----------(11)
(1-4)　風車について----------(13)
1-4-1　風車の種類----------(13)
1-4-2　風車の性能----------(14)
1-4-3　風車の理論最大効率　（ベッツの定理）　----------(16)
(1-5)　風力発電システムの構成と仕組み----------(19)
(1-6)　発電機の種類と系統連系----------(23)
(1-7)　風力発電における課題----------(25)
(1-8)　風力発電の導入に関する動向----------(27)
1-8-1　世界にける風力発電の現状----------(27)
1-8-2　日本における風力発電の現状----------(29)
第 2 章　複数の風力発電機から成るウィンドーファームを含む電力系統の周波数変動解析
(2-1)　シミュレーションモデル----------(32)
2-1-1　モデル系統----------(32)
2-1-2　風車モデル----------(33)
2-1-3　ピッチ制御系----------(34)
2-1-4　自動電圧調整装置(AVR)----------(35)
2-1-5　負荷周波数制御(LFC) ----------(35)
2-1-6　調速機モデル----------(36)
(2-2)　シミュレーション条件----------(38)
(2-3)　シミュレーション結果----------(38)
2-3-1　重負荷時(100[MVA])の結果----------(38)
2-3-2　軽負荷時(60[MVA])の結果----------(41)

(2-4)　まとめ----------(43)

第 3 章　風力発電機のピッチ角制御による電力系統の周波数変動抑制に関する検討(I)
(3-1)　モデル系統----------(44)
(3-2)　従来のピッチ角制御系----------(46)
(3-3)　SMA と EMS ピッチ角制御----------(46)
3-3-1　単純移動平均（SMA）----------(46)
3-3-2　指数移動平均（EMA）----------(47)
(3-4)　シミュレーション条件----------(48)
(3-5)　シミュレーション結果----------(49)
3-5-1　ウインドファーム容量 5[MVA]、負荷 100[MVA]時の結果----------(49)
3-5-2　ウインドファーム容量 5[MVA]、負荷 60[MVA]時の結果----------(52)
3-5-3　ウインドファーム容量 10[MVA]、負荷 100[MVA]時の結果----------(54)
3-5-4　ウインドファーム容量 10[MVA]、負荷 60[MVA]時の結果----------(57)
(3-6)　まとめ----------(59)
第 4 章　風力発電機のピッチ角制御による電力系統の周波数変動抑制に関する検討（II)
(4-1)　シミュレーションモデル----------(60)
4-1-1　モデル系統----------(60)
4-1-2　自動電圧調整装置(AVR)----------(61)
4-1-3　負荷周波数制御(LFC) ----------(62)
4-1-4　調速機モデル----------(62)
(4-2)　ピッチ角制御系----------(64)
4-2-1　EMA ピッチ制御系----------(64)
4-2-2　新 LPF ピッチ制御系----------(64)
(4-3)　シミュレーション条件----------(65)
(4-4)　シミュレーション結果----------(66)
4-4-1　ウインドファーム容量 5[MVA]、負荷 100[MVA]時の結果----------(66)
4-4-2　ウインドファーム容量 5[MVA]、 負荷 60[MVA]時の結果----------(68)
4-4-3　ウインドファーム容量 10[MVA]、負荷:100[MVA]の結果----------(69)
4-4-4　ウインドファーム容量 10[MVA]、負荷:60[MVA]の結果----------(70)
(4-5)　まとめ----------(71)
第 5 章　風力発電機のピッチ角制御による電力系統の周波数変動抑制に関する検討（III)

(5-1)　シミュレーションモデル----------(72)
5-1-1　モデル系統----------(72)
5-1-2　自動電圧調整装置(AVR)----------(73)
5-1-3　負荷周波数制御(LFC) ----------(74)
5-1-4　調速機----------(74)
(5-2)　新ピッチ角制御系----------(76)
(5-3)　シミュレーション条件----------(76)
(5-4)　シミュレーション結果----------(77)
(5-5)　まとめ----------(80)
第 6 章　永久磁石形風力発電機(PMSG)による負荷周波数変動抑制制御に関する検討
(6-1)　シミュレーションモデル----------(81)
6-1-1　モデル系統----------(81)
6-1-2　風車モデル----------(83)
6-1-3　ピッチ角制御系----------(85)
6-1-4　自動電圧調整装置(AVR)　モデル----------(86)
6-1-5　調速機モデル----------(86)
(6-2)　可変速度風力発電機 PMSG の制御システム----------(87)
6-2-1　PMSG の制御システム----------(87)
6-2-2　PMSG の系統側と発電機側のブロックモデル----------(88)
6-2-3　PMSG による負荷周波数制御システム----------(89)
(6-3)　シミュレーション条件----------(90)
(6-4)　シミュレーション結果----------(91)
(6-5)　まとめ----------(93)
あとが----------(94)
謝辞----------(95)
参考文献----------(96)
発表文献----------(98)

第 1 章 風力発電について

1-1 再生可能エネルギーの必要性[1][2][7][8]

1-1-1 地球環境問題

世界人口は年間 9400 万人の割合で増え続けており、特に人口増加の著しいのは開発途上国である。アメリカ合衆国統計局によると、世界の人口は 1971 年に 40 億人、1987 年には 50 億人になり，2000 年には 60 億人を超え、2011 年には 70 億人を超えた。そして 2050 年には 90 億人に達すると予測されている[2]。世界人口の推移を図 1-1 に示す。一般の社会現象における将来予測は困難なことが多く、高い精度は期待できないが、人口に関しては予測と現実が比較的よく一致している。このような人口の増加は食料とエネルギー需要の増加を意味している。そして、人々の物質的な豊かさや生活の快適さを追い求める要素は、さらにエネルギー消費を加速度的に増大させる事になる。

エネルギー資源が無限にあれば枯渇の心配はないが、資源は有限であっていずれ枯渇する日がやってくる。特に、世界のエネルギー需要の 90%を賄う化石燃料、なかでも石油や天然ガスのような良質な化石燃料の埋蔵量は豊富ではない。また、化石燃料の大量消費によって、地球の温暖化や酸性雨、あるいは生態系の破壊など環境問題が次第に目立つようになってきた。このままでは問題は深刻さを増すばかりである。これまでのように大量のエネルギーを消費しなければ発展できないような社会ではなく、適切なエネルギー消費で持続可能な発展を期待できるような社会を構築してゆかなければならない。

図 1-2 に日本の経済成長とエネルギー供給の推移を示す[2]。GDP (Gross Domestic Product)とは、一定期間内に国内で産み出された付加価値の総額を示す。経済を総合的に把握する統計である国民経済計算の中の一指標で、GDP の伸び率が経済成長率に値する。この図より、GDP の上昇と合わせるように、エネルギー供給の全てが右肩上がりの拡大の方向にあることがわかる。このような人口や経済成長、エネルギー供給の右肩上がりの拡大基調がいつまでも続くことはありえない。また、人類の経済活動とエネルギー消費の間には密接不可分の関係があり、一定の経済成長を成し遂げるためにはエネルギー消費の増大が不可欠である。しかも、現在は、一次エネルギーの大部分を化石燃料に依存しているために、化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素は、エネルギー消費の増加によって、その排出量も増加し、地球の温暖化を助長することになる。世界の化石燃料消費量の増加と大気中における二酸化炭素濃度の変化を図 1-3 に示し[7]、世界の年平均気温の偏差の経年変化を図 1-4 に示しているが[8]、化石燃料の消費の増加と大気中における二酸化炭素濃度の増加の間にはきわめて強い相関があることを読み

取ることができる。

図 1-1.　世界人口の推移(推計値)

図 1-2.　経済成長とエネルギー供給の推移

図 1-3.　化石燃料からの CO2 排出量と大気中の CO2 濃度の変化

図 1-4.　世界の年平均気温の偏差の経年変化（1891～2012 年）

1-1-2 化石燃料の枯渇

化石燃料は燃焼すると二酸化炭素をはじめとした温室効果ガスを発生するという問題がある。それ以外にも、化石燃料は埋蔵年数が限られており、石油は 41 年、石炭は 204 年、天然ガスは 61 年、ウランは 61 年となっている。特に、最近では途上国である中国やインドなどが化石燃料などを大量に消費しているという背景がある。また、これらの途上国は経済成長を維持するため世界中からエネルギー資源をかき集めており、今後資源の争奪戦が激化していくものと考えられる。それ以外にも、化石燃料は中東近郊など政情が不安定なところから産出されることから価格など不透明であり、1970 年代における 2 度のオイルショックにより世界経済は石油に依存して来たことの危険性を強く認識した。こういったことから循環して利用することが可能な再生可能エネルギーやプルサーマルを利用することが今後の安定したエネルギー供給に有効であると思われる。将来的には安定に供給でき枯渇することのない再生可能エネルギーと燃料サイクルを実現した原子力発電が主流になっていくことが望ましい。各燃料の可採年数を図 1-5 に示す[9]。

図 1-5.　各燃料の可採年数

1-2 風力発電とは[10]

風力発電は、風の力(風力)によって発電機を回して発電する方式である。風力エネルギーは、再生可能エネルギーの 1 つである。地球環境の保全、エネルギーセキュリティの確保、経済成長の維持を同時に実現可能なエネルギー源として、世界各地で普及が進んでいる。

一般に風は上空に行くほど強くなるという特徴を有しており、また取得できる風力エネルギーは受風面積に比例することから、近年の商業用風車の風車高は高く、受風面積も大きくするよう改良されてきており、現状では最大5MWの大型機が運転している。風車を構成している主要な機器は、図1-6[11]に示すように風を受けるブレード(羽)、発電機、タワー、制御盤(電圧調整器、インバータ、コンバータなど)、系統連系保護装置(系統連系の場合)である。

風力発電の特徴は、エネルギー源が自然の風であるため、無尽蔵で無償であること、エネルギーを得る際に、火力発電や原子力発電に見られるように二酸化炭素や放射性廃棄物などの環境汚染物質の排出がまったくなく、クリーンな発電システムであることなどがあげられる。しかし、風は常に変化し風向や風速が絶えず変動するため、安定した発電出力が得にくいことや、風のエネルギー密度が小さいことなどが短所となっている。これらの短所を、風力発電に適した風況の場所での導入、大型風車設置による発電出力の増大、風車の複数設置による発電出力の増大と安定化などで補えば、環境にやさしい発電設備として運用可能である。

図 1-6.　風車の構成

1-3 風力発電の長所と短所

古代ギリシャの哲学者ヘラクレイトスは「万物は流転する」と述べている。そして、世界は「変化することによって安息している」とも。その意味は、あらゆる事物は、互いに関連し、対立し、せめぎあい、そして変化し、発展し、また巡り帰る、というプロセスを辿りながら、全体としてバランスを保つ、つまり、世界は変化を通じて統一と秩序を保つのだ、ということのようである。

私たちは、現在のままの文明社会が 21 世紀にも続いていくならば、「経済の発展」、「資源・エネルギーの確保」、「環境の保全」という、人類が達成すべき三つの目標を同時には達成出来ないと考えられる。なぜならば、この三つの目標は互いに複雑に関連し、ときには相互に対立しているために、ある目標だけを優先して達成しようと努力しても、他の一つまたは二つの目標がなおざりにされてしまうといったように、三つの目標の同時達成が極めて困難だからである。その結果、人類は自らの存亡にかかわる大きな危機に直面するであろうという問題意識を持ち、これを "トリレンマ問題"と言っている。

今は、経済発展、資源・エネルギーの確保、環境の保全の三つの目標が、互いに対立し、せめぎあうトリレンマの状態にある。「再生可能エネルギーによるトリレンマの克服」のための 1 つの方法として、風力エネルギーから電力を発電する風力発電が期待されている。風力発電は、従来の石油火力などのような集中型電源とは様々な点で異なる特徴を持つ。それは CO_2 などの温室効果ガスの排出が少ないことと、将来にわたって発電用燃料の調達リスク(コスト)が無いことが最大の長所であるが、その他の長所も無視できない効果を持つ。一方、出力が変動するなどの欠点も有し、対策を要する場合もある。

図 1-7 に各種電源別の CO_2 排出量を示す[12][13]。図のように、石炭、石油火力などの電源は CO_2 の排出量が極めて多く、特に発電時の排出量が多い。しかしながら、太陽光、風力、原子力などの電源は設置や運用にわずかの CO_2 を排出するが、発電時の CO_2 の排出量はゼロである。しかし、原子力は発電時の CO_2 の排出こそないものの、核燃料の製造と使用後の廃棄物の長期保管については冷却を継続するために、結果として二酸化炭素の発生があり、また放射性廃棄物の排出に関して二酸化炭素とは次元の異なる桁違いに大きな環境負荷因子であることも論をまたない。

また、風力発電は発電用燃料が風であるため、枯渇の心配が無く、石油などのように輸入したりする必要が無い。ゆえに、化石燃料の枯渇問題や地球環境問題などで騒がれるなか、安定でクリーンな電源として期待されている。

図 1-7.　各種電源別の CO_2 排出量

さらに風力発電の資源量は大きく、開発可能な量だけで人類の電力需要を充分に賄えるとされている。日本でも軽視できない量が開発可能であると推定されている。世界全体では少なくとも約 72TW(テラワット)が風力によって発電可能とされる。これは世界全体の電力需要量(14TW)の約 5 倍に相当する。また、日本では風況が悪く、土地が狭いことから風力発電には向かないという意見があったが、これは都市部に多い気象庁の観測点のデータで判断したためと言われ、実際には NEDO による風況調査などで設置有望地域が多く存在する可能性が示されている[13]。現時点での調査結果からは、日本の陸上で発電可能な量は日本の総発電量の 7~10% と言われている。この計算結果は風車の高さの設定に大きく影響される。小型の高さ 40m の風車では風が弱いために 2~3%程度となるが、最近の大型の風車を仮定し、高さ 100m の風車で計算した場合では数倍になる。さらに洋上発電まで考慮すれば、潜在的には 20~30%程度まで可能という指摘もある。以下に風力発電の長所と短所を示す。

長所

(1)再生可能エネルギーを用いた発電方法の中では比較的発電コストが低く、事業化が比較的容易である。
(2)エネルギー自給率の向上が見込める。
(3)離島など、燃料源の確保や送電コストの高い地域にて独立電源として活用できる。

(4) 小型のものは需要地に隣接して設置可能であり、送電コストの低減に役立つ場合がある。
(5) 個々の設備が比較的小規模で、規模によっては個人でも運用可能である。
(6) 工期が短く、需要総量の変動に対応しやすい。また投資してから運転開始までの利子も少なく済む。
(7) 運転用燃料を必要としないため、物価変動要因（インフレなど）の事業リスクが少ない。
(8) 修理や点検が比較的容易であり、必要な時間も短くできる。

短所

(1) 風速の変動に伴って、出力が需要と関係なく変動する。特に個々の風車で見ると変動は激しい（多くの風車がまとまると緩和される。これをウィンドファーム効果という）。
(2) 夜間も発電するため、他電源の出力や需要の状況によっては夜間の余剰電力を増大させる。
(3) 現時点では既存の発電方式よりコストが高めである（ただし温暖化ガス排出量の差を考慮したコストは低いとされる）。
(4) 風車を設置する場所の風況が事業の採算性に大きく影響する。
(5) ブレードに鳥が巻き込まれて死傷する場合がある。
(6) 周囲に騒音被害を与える場合がある（但し近年これの改良が進んでいる）。
(7) 想定値以上の強度の落雷や強風などにより、破損する場合がある。
(8) 故障したときわが国ではメーカーが国外のものが主流なため修理に時間がかかる。

1-4 風車について [14] [15] [16]

1-4-1 風車の種類

風車の分類

風車にはさまざまな種類がある。図 1-8 に代表的な風車の形式を示す。一般に、風向に対する回転軸の位置から水平軸型と垂直軸型、その作動原理から揚力型と抗力型とに分類される。

図 1-8.　風車の形式

水平軸型風車および垂直軸型風車

水平軸型風車は、風向に対して

平行な回転軸を有する風車であり、プロペラ型・多翼型・オランダ型・セルウィング型などがこれに含まれる。水平軸型では、風車の回転面が常に風の吹く方向を向いている必要がある。また、水平軸型風車の中で、回転面がタワーの風上側にある風車をアップウィンド型風車という。アップウィンド型風車では、方位制御装置の働きにより、その回転面は常に風の方向を向くようになっている。一方、回転面がタワーの風下側にある風車を、ダウンウィンド型風車という。ダウンウィンド型風車では、風向きが変わったとき、その回転面が自動的に風の方向を向くような力が作用するため、特に小型風車では方位制御装置を必要としない場合が多い。

垂直軸型風車は、風向きに対し直角方向(地面に垂直なものが多い)の回転軸を有する風車であり、ダリウス型・直線翼垂直型・サボニウス型・クロスフロー型などがこれに含まれる。垂直軸型風車は、どの方向から風を受けても回転することができるため、方位制御装置を必要としない。

揚力型風車と抗力型風車

物体が風から受ける力を風に垂直な成分と平行な成分に分けて考えた時、垂直方向の成分の力を揚力といい、平行方向の成分の力を抗力と呼ぶ。このうち、主に揚力の作用により回転する風車を揚力型風車といい、プロペラ型・ダリウス型・直線翼垂直軸型などがこれに含まれる。揚力の作用により、風速の数倍～10 倍という高い周速度が得られる事から、発電用風車として用いられることが多い。

また、主に抗力の作用により回転する風車を抗力型風車といい、多翼型・サボニウス型・クロスフロー型などがこれに含まれる。抗力型風車は、風速より高い回転速度を得ることはできないものの回転力(トルク)が大きいため、揚水・製粉などの動力用風車として用いられることが多い。

1-4-2 風車の性能

パワー係数

質量 m、速度 V の物体の運動エネルギーは、$(1/2)mV^2$ であるから、密度 ρ、体積 AL(面積 A×距離 L)の空気が速度 V で移動するときのエネルギーE_W [J]は(1.1)式で与えられる。

$$E_W = \frac{1}{2}\rho ALV^2 \quad \cdots\cdots (1.1)$$

空気が距離 L を時間 t で通過するとき、空気の速度 V は $V=L/t$ で表す事ができるから、

$$E_W = \frac{1}{2}\rho AV^3 t \quad \cdots\cdots (1.2)$$

よって、単位時間に面積 A を通過する、風のエネルギーP_W[W] ([J/s])は

$$P_W = \frac{1}{2}\rho A V^3 \quad \cdots\cdots (1.3)$$

となる。ここで、風車により取り出すことができる単位時間当たりのエネルギーをパワー(出力)P といい、風車のパワーP と風のパワーP_Wの比をパワー係数(出力係数)C_pといい、風の持つパワーのうち、風車によりどれだけパワーを取り出せるかを表す性能評価指標式と言え、(1.4)式に表す。

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V^3} \quad \cdots\cdots (1.4)$$

トルク係数

風車を回転させようとするモーメント(回転力)を、トルク τ [N･m]といい、

$$C_\tau = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho A V^2 R} \quad \cdots\cdots (1.5)$$

をトルク係数という。ここで、R は風車半径[m]である。トルク係数は、風車より発生しうる回転力のうち、風車にどれだけトルクとして利用できたかを表す性能評価指数である。

推力係数

風が風車を後方に押す力を推力 T[N]といい、

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A V^2} \quad \cdots\cdots (1.6)$$

を推力係数という。推力係数は、風の及ぼす力のうち、どれだけ風車を後方に押す力として作用したかを表す性能評価指数である。

周速比

ブレード先端速度(周速度)V_R[m/s]と流入風速 V[m/s]の比を周速比 λ という。

$$\lambda = \frac{V_R}{V} = \frac{2\pi R n}{V} \quad \cdots\cdots (1.7)$$

周速比は風車の種類により大きく異なり、プロペラ型などの揚力型風車では一般に λ=3~10 であるのに対し、抗力型では $\lambda \leq 1$ となる。この式を風車回転数 n [r/sec]について書き換えると

$$n = \frac{\lambda V}{2\pi R} \quad \cdots\cdots (1.8)$$

となるが、この式から、同じ周速比の風車でも、小型風車(R 小)の方が大型風車(R 大)より大きくなる事がわかる

1-4-3 風車の理論最大効率（ベッツの定理）

揚力型風車の最大パワー係数

運動量理論を用いて、揚力型風車が取り出すことのできる理論最大効率を求める事とする。その前段として、以下の仮定を行う。

・比圧縮性流体　・摩擦抵抗がない　・ブレード枚数が無限大　・一様な流れ

・ロータ面全体にわたり一様な推力　・回転無しの後流

・ロータの無限前方、無限後方、乱されていない周囲の静圧は等しい

風車の前後の流れの模式図を図 1-9 に示す。図中、位置を数字で表現し、遠上流を 0、ロータ上流面を 1、下流面を 2、遠方下流面を 3 とする。各記号は、P が圧力 A が断面積、V が断面の平均風速である。

図 1-9.　風車前後の流れ

図 1-9 のような流れを考えると、質量保存則から

$$\rho A_1 V_1 = \rho A V = \rho A_2 V_2 \quad \cdots\cdots (1.9)$$

空気の密度 ρ は一定であるから

$$A_1 V_1 = A V = A_2 V_2 \quad \cdots\cdots (1.10)$$

ロータへの推力 T[N]は、流れの流入と流出の間の運動量変化に等しい事から、次式のようになる。

$$T = \frac{dm}{dt}\left(V_1 - V_2\right) = \rho A V \left(V_1 - V_2\right) \quad \cdots\cdots (1.11)$$

推力 T はまた、ロータ前後の静圧変化と面積との積に等しい事から

$$T = \left(p^+ - p^-\right) A \quad \cdots\cdots (1.12)$$

ここで、ロータの上流･下流の各々にベルヌーイの式を適用すると

$$\left.\begin{aligned} p_\infty + \frac{1}{2}\rho V_1^2 &= p^+ + \frac{1}{2}\rho V^2 \\ p^- + \frac{1}{2}\rho V^2 &= p_\infty + \frac{1}{2}\rho V_2{}^2 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (1.13)$$

よって

$$p^+ - p^- = \frac{1}{2}\rho (V_1^2 - V_2^2) \quad \cdots\cdots (1.14)$$

(1.14)式を(1.12)式に代入すると

$$T = \frac{1}{2}\rho\left(V_1^2 - V_2^2\right) A \quad \cdots\cdots (1.15)$$

(1.15)式と(1.11)式を等置すると

$$\frac{1}{2}\rho\left(V_1^2 - V_2^2\right) A = \rho A V \left(V_1 - V_2\right) \quad \cdots\cdots (1.16)$$

したがって、

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \cdots\cdots (1.17)$$

この式は、ロータを通過する流れの速度が、上流の自由流れの速度と後流の速度の平均値となる事を示している。

ここで、次式で定義される速度低減率(軸方向誘導係数)a を導入する。

$$\alpha = \frac{V_1 - V}{V_1} \quad \cdots\cdots (1.18)$$

(1.18)式を(1.17)に代入すると

$$V_2 = V_1(1-2a) \quad \cdots\cdots (1.19)$$

ロータにより取り出される出力 P は、単位時間当たりの運動エネルギーの変化に等しいことから

$$P = \frac{1}{2}\frac{dm}{dt}\left(V_1^2 - V_2^2\right) = \frac{1}{2}\rho A V\left(V_1^2 - V_2^2\right) \quad \cdots\cdots (1.20)$$

(1.17)式、(1.19)式及び(1.20)式から、出力 P[W]は次式で表される。

$$P = \frac{1}{2}\rho A V_1^3\left[4a\left(1-a\right)^2\right] \quad \cdots\cdots (1.21)$$

このとき、風のパワーは

$$P_W = \frac{1}{2}\rho A V_1^3 \quad \cdots\cdots (1.22)$$

であることから、パワー係数 C_p は次式で定義される。

$$C_p = 4a\left(1-a\right)^2 \quad \cdots\cdots (1.23)$$

パワー係数の最大値を得るため、(1.24)式を微分して 0 となる値を求める。

$$\frac{dC_p}{da} = 4\left(a-1\right)\left(3a-1\right) = 0 \quad \cdots\cdots (1.24)$$

よって、a=1、a=1/3 となる。a=1 は速度低減率 100%(V=0)を意味し、(1.23)式でも C_p=0 となってしまう。そこで、a=1/3 を採用することとすると、(1.23)式から次式の最大パワー係数を得る。

$$C_{p_\max} = \frac{16}{27} \cong 0.593 \quad \cdots\cdots (1.25)$$

すなわち、風車の最大効率は 59.3%となる。これはあくまで理想流体に対する最大値であって、実際には、最大効率は 45~48%付近である。

1-5 風力発電システムの構成と仕組み[14]

風力発電は、風力エネルギーを電気エネルギーに変換するものであるが、変換の過程には、風の運動エネルギーを風車(風力タービン)により回転という動力エネルギーに変換し、次にその回転を歯車で増速した後、または直接発電機に伝送し電気エネルギーに変換を行うものである。

一般に風は地上から上空に向かうほど強くなるため、風車の高さ(ハブ高)はできるだけ高くしたほうが有利である。また、風車の取得エネルギーは風車の羽の長さの 2 乗、すなわち羽が描く回転面の受風面積に比例するためブレードは長いほうが有利である。現在、多く用いられているプロペラ式風車の大きさと風車定格出力の関係を図 1-10 に示す[17]。

図 1-10.　商業風車の出力と大きさの比較

風は風向や風速が絶えず変動するため、安定した発電電力が得にくいことや風のエネルギー密度が小さいことから、風力発電システムには、常に羽根の回転面を風の方向に向けるためのヨー制御や出力を制御するピッチ制御の機能等が備わっており、より多くの安定した出力が得られるような工夫がなされている。また、低風速でも効率のよい発電が可能となるよう発電機の極数を変えたり、大小 2 つの発電機を備えて風速により発電機を切り替えるなど、幅広い風速領域で効率よく発電が行える風力発電システムもある。

安定した出力や発電効率を上げるためには、風力発電に適した風況が得られる場所に風車を設置することが重要であるが、風車の大型化や複数設置によって発電出力の増大と平滑化が期待でき、さらに発電単価が低減されるため、ウインドファームの大規模化に併せて風車の大型化が進む傾向がある。

表 1-1 に中型機で一般的なプロペラ風力発電システムについてまとめた。構成はロータ系、伝達系、電気系、運転･制御系に大別される。また、図 1-11 に風力発電システムの構成を示した。

表 1-1.　風力発電システムの概要

ロータ系	ブレード	回転羽根、翼
	ロータ軸	ブレードの回転軸
	ハブ	ブレードの付け根をロータ軸に連結する部分
伝達系	動力伝達軸	ロータの回転を発電機に伝達する
	増幅機	ロータの回転数を発電機に必要な回転数に増速する歯車(ギア)装置
電気系	発電機	回転エネルギーを電気エネルギーに変換する
	電力変換装置	直流、交流を変換する装置(インバータ、コンバータ)
	変圧器	系統からの電気、系統への電気の電圧を変換する装置
	系統連系保護装置	風力発電システムの異常、系統事故時等に設備を系統から切り離し、系統側の損傷を防ぐ保護装置
運転制御系	出力制御	風車出力を制御するピッチ制御あるいはストール制御
	ヨー制御	ロータの向きを風向に追従させる
	ブレーキ装置	台風時、点検時にロータを停止させる
	風向・風速計	出力制御、ヨー制御に使用されナセル上に設置される
支持構造系	ナセル	伝達軸、増速機、発電機等を収納する部分
	タワー	ロータ、ナセルを支える部分
	基礎	タワーを支える基礎部分

図 1-11.　風力発電機の構成

ブレード

ブレードの枚数としては 1 枚~複数枚あり、3 枚ブレードが一般的に振動が起きにくく安定性がよいため主流となっている。枚数を少なくして同じ出力を得るにはブレードを長く、回転速度を高速にする必要があり、輸送･材質の強度の制約や騒音が大きくなるという問題があるが、コストダウンできる可能性がある。ブレードの材質としては、軽量で耐久性が良いことが要求され、現在では主としてガラス繊維強化プラスチック(GFRP)が用いられるが、近年の風車の大型化に伴い炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のブレードも一部で採用されている。

増速機

ロータの回転数はその直径にもよるが毎分数十回転であり、同期発電機の場合は直結駆動が多いが、風力発電システムで多く用いられている誘導発電機の回転数は一般に毎分1,500 回転（50Hz 用）または1,800 回転（60Hz 用）であるため、歯車（ギア）を用いて増速を行う。歯車の方式としては、大きさの異なる2つの歯車が平行に噛み合い動力を伝える平行式(ヘリカル式)、外周歯車と中央の小さな太陽歯車の間にある遊星歯車が動力を伝える遊星式(プラネタリー式)、平行式と遊星式を併用した併用式等がある。風車騒音のうち、機械騒音源の主たるものが増速歯車であるので、同期発電機を採用して発電機を多極化し歯車をなくしたギアレス風車があり、可変速で運転される。可変速運転とは、ロータの回転速度を風の強さに応じて変化させる運転方法であり、ブレードや主軸への荷重が軽減され機械・材料設計が容易になり、そのため軽量化が図れる。

発電機

交流発電機のタイプとして誘導発電機と同期発電機の2 種類がある。誘導発電機は、出力変動による電圧変動の問題があるが、構造が簡単で低コストであり、広く用いられている。同期発電機は、電圧制御が可能なため系統への影響が少なく、また独立運転も可能であるという利点を持つが、誘導発電機に比べコスト増になる傾向がある。交流発電機の極数は一般に4 極が用いられるが、6 極と4 極の極数変換方式を採用し、ロータ回転数を低速／高速運転の2 段切替えとすることにより、カットイン（起動）風速を下げて低速風域における発電量を増やす例がある。この場合、定格出力は大小2つの数字（例：1000/250kW）で表される。

系統連系

交流発電機の出力を系統に連系する場合、基本的には変圧器のみを介して直接系統に接続するAC リンク方式と、発電機の交流出力を一旦直流に変換するコンバータとさらに系統と同じ周波数の交流に変換するインバータ等から構成される電力変換装置を用いるDC リンク方式がある。誘導発電機の場合には、通常ACリンク方式が採用されて

いる。

運転制御

発電機の定格出力は限られているため、定格風速以上では風車出力の制御を行う必要があり、出力制御方式としてピッチ制御とストール(失速)制御、従来のストールブレード形状とブレードの可変角度機構を組み合わせたアクティブストール制御が用いられる。また、風速の向きに追従させるヨー制御、安全管理と運転管理の面からブレーキ装置と運転監視装置がある。

ピッチ制御

ピッチ制御は、風速・発電機出力を検知して、ブレードの取り付け角（ピッチ角）を変化させることにより出力を制御するもので、通常油圧で行うが、小型機ではメカニカルガバナー等機械的に行うものもある。ピッチ制御システムは、出力制御を行うだけでなく、台風等による強風時にはピッチ角を風向に平行（フェザー状態）にしロータを停止させ風圧を小さくする機能や、回転数制御による過回転防止等の安全・制動装置としても用いられる。

ストール制御

ストール制御はピッチ角を固定とし、風速が一定以上になるとブレードの形状の空気特性により失速現象が起こり、出力が低下することを利用して制御するもので、ピッチ制御に対して構造が簡単で低コストである。ブレードの先端には安全のためエアブレーキ用チップ（過回転時などに先端がブレード本体に対して約90°の角度となり、空力的にブレーキをかける機構）を備えていることが多い。

アクティブストール制御

アクティブストール制御は従来のストールブレード形状とブレードの取り付け角度を変化させ、ピッチ制御と比較して運転中のブレード作動を最小限に抑えることができる方式で、ブレード先端のエアブレーキ用チップはなく、ピッチ制御とストール制御を組み合わせた制御方式といえる。

ヨー制御

ヨー制御は、ロータの方向を風向に追従させるもので、アップウィンド方式の風車では強制（アクティブ）ヨーシステムを採用している。強制ヨーシステムは、風向センサーによりロータに相対的な風向を検知して、油圧あるいは電動モータによるヨー駆動装置を用いて、制御を行う。

ブレーキ装置

ピッチ制御の場合のフェザーリング装置以外に、油圧によるディスクブレーキ等がある。ストール制御の場合、ロータの過回転時にブレード先端に装着されたエアブレーキ用チップが遠心力により作動する空力ブレーキを備えているものが多く、機種によってはヨー制御によりロータの向きを風向に対して平行にすることも行われる。

運転監視装置

風車の起動や停止、運転状態の監視や記録を行う装置で事業者の運転管理室等と電話回線を通じて遠隔操作を行うこともある。さらにメーカーやメンテナンス会社に接続して緊急時の迅速な対応サービスを行っている場合もある。

タワー

国内のタワーの形状は円柱状のモノポール方式である。なお、タワーの材質は鋼製が一般的であるが、最近国内でもコンクリート製のタワーが建設された。

1-6 発電機の種類と系統連系[17]

風力発電機に用いられる発電機は誘導発電機と同期発電機に大別され、さらに前者は回転子がかご型をしている「かご型」と、回転子に巻き線を施してある「巻線型」があり、後者には励磁器を用いるものと、永久磁石を用いるものがある。図 1-12 に風力発電システムと連系方式を示した。この中で最も普及しているかご型誘導発電機は堅牢で安価であるが、突入電流が大きいという欠点を持っている。図 1-12 の(a),(b),(c)はかご型誘導発電機を用いたものを示す。一方、巻線型は二次抵抗やすべり出力を制御することにより、突入電流を抑えることができ、力率を制御することができるという特徴を持っている。図 1-12 の(d),(e),(f)は巻線型誘導発電機を用いたものを示す。また、同期発電機には、励磁器が必要な型と永久磁石により励磁が不要な型がある。図 1-12 の(g),(h)は励磁装置を用いたもの、図 1-12 の(i),(j)は永久磁石発電機を用いたものを示す。以下に各発電機と系統連系方式について記述する。

誘導発電機

誘導発電機は回転数を同期周波数より少し高くしてやることによって簡単に発電でき、系統連系の際に誘導電動機と同様な運転が可能である。かご型は回転子の形状がかごのようになっている。本研究で用いるのはこの発電機である。

また、巻線型誘導発電機は主に 2 次巻線抵抗制御と 2 次巻線電流制御(Doubly-fed 型)があり、前者は巻線式回転子の巻線に流れる電流を抵抗の変化により変化させるものである。起動電流抑制が可能だが、抵抗による電力ロスが大きいという欠点を持つ。一方、後者は 2 次巻線である回転子の電流を制御し、発電機有効・無効出力を制御する。この

方式では 2 次巻線側の制御に電力変換器を用いるため高価だが、発電機のすべり周波数と系統電圧の周波数を整合させ、同時に位相を制御することによって無効電力の制御と系統側からみた力率制御も行え、電力変換器の定格は発電機定格の半分以下でよいため、現在の可変速機で多く用いられている。

同期発電機

風力発電機と系統の連系を行う場合、系統連系線が弱く、突入電流制限や風速変動に伴う電圧変動の問題があるサイトにおいては, 誘導発電機の電気的弱点を解消するため同期発電機が用いられる。同期発電機には励磁器ありのものと励磁器のないものに大別できる。前者は励磁器付き巻線式同期発電機を用いて系統に接続するものである。同期発電機では回転子に供給する電流を励磁器により制御することで、無効電力を供給でき、力率制御が可能となり、誘導性･容量性のいずれの負荷にも対応できる。一方、前者の励磁器を永久磁石に置き換えたものが後者のモデルである。図に示すように、発電した電力をいったん直流に変換し、系統側の周波数と整合する交流に再び変換する DC-リンク方式では可変速運転と風荷重の低減が図れる。さらに、多極化することで増速ギアを省ける特徴を有している。

図 1-12.　風力発電機と連系方法の種類

1-7 風力発電における課題[18]

騒音

風力発電機から発生する騒音は、主としてナセル内部から発生する機械音と、ブレードから発生する風切り音とに大別される。最近では、風車専用厚翼の開発や二段切り替え発電機や連続可変速インバータ発電システムの開発によって空力騒音があまり出なくなってきている。さらに、多極発電機を用いることにより、ギヤレスになったり、ギ

ヤがあってもギヤボックスやナセルの密閉性が良くなり、外部への騒音の漏れが相当小さくなってきている。

電圧変動

風力発電機の突入電流は系統電圧を過渡的に低下させ、また、出力変動でも系統電圧に変動を生じさせる。これらの電圧変動は電力損失、生産性の低下、電気機器寿命の低下などを引き起こす原因となる。これらは自励式無効電力調整装置（自励 SVC）を設置することで緩和することができる。ただし、突入電流による電圧降下は数サイクルの短時間の減少となるため、自励 SVC の応答速度も高速のものが要求される。

周波数変動

風の強さは短い周期で相当に変動し、風の保有するエネルギーは風速の 3 乗に比例することから、風力発電は出力変動が大きい。風力発電機の導入量が拡大してくると、このような出力変動は周波数変動を引き起こす原因となる。これを小さくするための対策が必要となり、系統負荷に合わせて風力発電機の出力を制限するか、もしくは風力発電機自身の出力変動を蓄電池などを使用して平滑化するなどがある。本論文ではピッチ制御を利用して出力変動を補償する方法を検討している。また、風は地点ごとの違いも大きいため、複数の場所に風力発電機が設置されている場合には、各々の出力変動が打ち消し合う。すなわち短周期変動については、風車が多数台になると変動自体は大きくなるものの、全体で見れば出力は安定化する平滑化効果が期待できる。

電波障害

風力発電による電波障害としては、一般的には家屋へのテレビジョン電波に対する影響が検討されている。風車のタワーやナセルは金属であり、ブレードの表面あるいは内部に金属接合部材を用いている場合には、電波障害が発生する場合がある。各種マイクロウエーブ、携帯電話の送受信塔など、最近の通信事業の拡がりによって、電波と風車建設の関係は検討課題になりつつある。電波の通りやすい場所は風も通りやすく、最適地は物理的に重なる。したがって、電波塔を集中型にし、ランダムにどこへでも色々な高さの塔を建設することはやめるようにした方が良く、電波のルートを調査し、これを避けて設置する必要がある。

配電線

風力発電で発電するには、既設の配電線に接続する必要がある。配電線は、ほぼ全国に行き渡っているが、問題がいくつかある。それは、日本には多くの強風地帯があるが、生活がしにくいので人々が住んでいない。したがって、現在風の強い場所に風車を建設しようとすると、配電線がなかったり、あっても送電能力の低い配電線があるのみとい

う状況で利用効率が極めて低い。また、日本の送電網はヨーロッパ諸国と比べて遅れており、全国に張り巡らされた幹線が必ずしも強くなく、送電線建設コストが欧米諸国の4~5 倍という状況にある。よって、電力系統への影響を検証しつつ、系統の増強や電力品質維持等の系統強化を行う必要がある。

搬入路

大型風車を道路上を車両で搬送する場合、風車直径が 60[m]前後になるので、トンネルが小さかったり、山岳部で曲がりが多くかつ鋭角であったりすると搬送不能になる。搬送途中のトンネル、鉄道や道路の架橋の高さ、道路をまたぐ各種電線類も一つ一つ検討の必要がある。

生態系

生態系への影響は、当該地域に生息している植生の改変、その上に成り立つ小動物、さらにはそれを捕食する猛禽類などの生息環境の変化といった、広範囲かつ多項目に及びうるものである。最近では、それらを懸念する声も多く聞かれ、国内においてもようやく稼動後の事後調査が行われ始めている。

景観

ひとむかし前までは珍しさも手伝い、観光の目玉として集客力の向上にひと役買っていた風力発電機であるが、ある特定の地域に大規模な風力発電が林立することにより、目障りな印象を持たれるケースも生じており、景観上の悪影響を懸念する声が上がりはじめている。2003 年に環境省が開催した「国立・国定公園内における風力発電施設設備のあり方に関する検討会」は、風力発電が景観上及ぼす影響について、公式の場で議論がなされた国内初の事例であった。

1-8 風力発電の導入に関する動向[2][10]

1-8-1 世界における風力発電の現状[2]

風力発電は、再生可能エネルギーの中でも発電単価が比較的安価であることから実用化が進み、さらなる普及が期待されている新エネルギーの一つであり、既に欧米を中心に相当量の商業運転が行われている。図 1-13 は世界全体の風力発電導入量を示している[2]。世界風力会議（Global Wind Energy Council : GWEC）の 2013 年発行の Global Wind 2012 Report によると、世界の風力発電総設備容量は、前年の 238,050MW から 282,587MW に達し、2011 年比で 18.7%の増加になった。毎年、前年比 20～30%超の伸び率を示し、順調に増加している。特に、近年では中国の大規模な導入が目立っている。

出典：GWEC Global Wind 2012 Report

図 1-13.　世界全体の風力発電導入量の推移

最近では中国、アメリカの導入量の伸びが顕著であり前年度までの2倍ほどの大きさとなっている。2006年時点での風力発電導入量上位5カ国は、ドイツ、アメリカ、スペイン、インド、デンマークで、そこに中国が激しく追い上げるという形であった。2009年のデータではアメリカ、中国の伸びがすさまじくドイツを抜きアメリカが再び首位となった。また、最新の2012年末のデータでは中国がトップの26.7%（75,324MW）、順に、アメリカ21.2%（60,007MW）、ドイツ11.1%（31,308MW）、スペイン8.1%（22,796MW）、そしてインド6.5%（18,421MW）である。日本は、世界全体のわずか0.9%（2,641MW）を占めるに過ぎず順位も13位である。図1-14 に主要国における風力発電累積導入量の推移を示す[2]。

出典：GWEC Global Wind 2012 Report

図 1-14.　国別風力発電導入割合

1-8-2　日本における風力発電の現状[1][2]

従来、日本では風況が弱く、風力発電には向いていないという見方もあったが、1993 年度に NEDO が作成した全国風況マップにより、設置有望地域が多く存在する可能性が示された。風況精査や風力発電の導入に関して、1995 年度からの風力開発フィールドテスト事業、1997 年度からは地域新エネルギー導入促進事業、新エネルギー事業者支援対策事業がスタートした。日本における導入設備容量は、1994 年の国の新エネルギー導入大綱における導入目標である「2000 年に 20[MW]」を 1998 年にクリアし、2001 年 6 月に新たな導入目標「2010 年までに 3,000[MW]が示され、2007 年度末の総設備容量は約 1675[MW]に達している。2008 年度末には総設備容量 185 万 kW を超え、総設置基数は 1,517 基に達している。

平成 23.年 3 月 11 日に発生した東日本大震災及び東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて、我が国のエネルギー政策の見直しが行われており、今後の日本のエネルギー供給を支えるエネルギー源として、新エネルギーへの期待が高まっている。

また、風力発電は他の再生可能エネルギーと比較して発電コストが低く、中長期的に風力発電の大規模な導入が期待されている。2012 年度末に総設備容量 264 万 kW、総設置基数 1,913 基となっている。

一方、2003 年 4 月より「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法(RPS 法)」が施行され、10 電力会社のほか電力を小売・卸売りする事業者に対して一定割合で再生可能エネルギーによる発電電力の買取りを義務付けた。これにより電力購入メニューは「電気」と「新エネルギー等相当量」に分離され、現状では電力会社によってその対応は異なっている。

日本における風力発電の導入量(累積値)の推移を図 1-15 に、地域別の導入状況を図 1-16 に示す。導入量は、1990 年代後半からの加速的な増加が顕著で、特に 1999 年度と 2001 年度はそれぞれ前年度の導入量を大幅に上回り伸び率は 100%超えている。ただ、2002 年度以降伸び率に減少傾向が認められるものの、依然として 3 割台の伸び率を呈している。このような風力発電の急激な増加は、前述の法令や制度の改正のみならず、事業規模や風車の大型化等によっている。地域別の導入状況では、北海道、東北(特に、青森県)、九州(特に、鹿児島県)における導入量の多い傾向が認められる。2005 年度には鳥取県や高知県でも導入量の増加が著しい。また、北海道においては、稚内市に 57 基(57[MW])から成る宗谷岬ウインドファームが完成し、風力発電機の導入量が全国第 1 位となった。2012 年度は、青森県が 2 万 2 千 kW(10 基)の風車を導入しました。また、鹿児島県が 2 万 kW(10 基)、茨城県が 1 万 6 千 kW(8 基)、兵庫県が 1 万 2 千 kW(6 基)、秋田県が 1 万 kW（5 基)、山形県が 2 千ｋW(１基)となった。

図 1-15.　日本における風力発電導入量の推移

図 1-16.　地域別の風力発電の導入量

以上のように第一章では風力発電について記述した。現在、風力発電は増加傾向にあるが、系統に対してその出力変動が無視できないレベルになりつつある。そこで、次章から風力発電による周波数変動の特性に関してシミュレーション解析を基礎として検討する。

第2章 複数の風力発電機から成るウインドファームを含む電力系統の周波数変動解析

風力エネルギーは無尽蔵、クリーンなエネルギーであるが、風向、風速などの自然条件に影響され、安定したエネルギー供給が難しい。そのため、風力発電量も変動し、変動量が増大すると電力系統の電圧変動や周波数変動を引き起こし、電力の品質の低下を招き安定な電力供給に支障をきたす。周波数変動の問題は、負荷が軽くなり電力系統の調整能力が小さくなる深夜に顕著である。そこで、第 2 章では風力発電機 5 機から成るウインドファームを想定して、その容量と負荷の容量（系統容量 100[MVA]に対して、重負荷:100[MVA]、軽負荷:60[MVA]）の条件を変えることにより周波数にどのような影響を与えるかを電力系統解析ソフト PSCAD/EMTDC を用いて検討する。

2-1 シミュレーションモデル

2-1-1 モデル系統[5]

本解析で用いたモデル系統を図 2-1 に示す。風力発電機 5 機から成るウインドファーム(WF)と水力発電機 1 機、火力発電機 2 機、原子力発電機 1 機と負荷から成り、IG は風力発電機としての誘導発電機(IGn, n=1,2,,,,5)で、SG1 は水力発電機(LFC)、SG2(LFC)と SG3(ガバナフリー運転, G.F) は火力発電機、SG4 は原子力発電機(ロードリミット運転, L.L)としての同期発電機である。また、WF に並列コンデンサ Xc を設置し、誘導機の無効電力消費を補償している。さらに、送電線のインピーダンス等で低下した電圧を補うため並列コンデンサ Qc を負荷端子に設置した。誘導機モデルとして普通かご形、同期機モデルとして SG1 は突極形、SG2,SG3,SG4 は円筒形を用いた。ただし、誘導機、同期機の磁気飽和は考慮していない。発電機定数を表 2-1 に初期運転条件を表 2-2 に示す。

表 2-1　発電機定数

Induction Generator				Synchronous Generator				
	Squirrel cage type (IG)				Salient pole type (SG1)	Cylindrical rotor type		
						SG2	SG3	SG4
MVA(each)	0.6	1	2	MVA	20	20	30	30
R_1 [pu]	0.01			Xd [pu]	1.2	2.11		
X_1 [pu]	0.18			Xq [pu]	0.7	2.02		
X_{mu} [pu]	10			2H [sec]	2.5	2.32		
R_2 [pu]	0.015							
X_2 [pu]	0.12							
2H [sec]	1.5							

表 2-2　初期運転条件

	WF	SG1	SG2,SG3,SG4
P	1.00	1.00	1.00
V	1.05	1.05	1.05
Q	0.00	-	-
s(Slip)	-1.733%	-	-

図 2-1.　モデル系統

2-1-2 風車モデル[19][20]

本論文では全ての風車モデルに MOD-2 風車を用いた[19]。MOD-2 風車のモデリング式は以下のように表現できる。

$$P_{wtb} = \frac{1}{2}\rho C_P(\lambda)\pi R^2 V_w^{\ 3} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{wtb} R}{V_w} \cdots\cdots (2.2)$$

$$C_P(\lambda) = 0.5(\Gamma - 0.022\beta^2 - 5.6)e^{-0.17\Gamma} \cdots\cdots (2.3)$$

$$\Gamma = \frac{R}{\lambda} \cdot \frac{3600}{1609} \cdots\cdots (2.4)$$

$$\left(\begin{array}{l} P_{wtb}\text{:風車出力[W]} \quad \lambda\text{:周速比} \quad R\text{:風車半径[m]} \\ \omega_{wtb}\text{:風車角速度[rad/s]} \quad \beta\text{:ブレードピッチ角[deg]} \\ V_w\text{:風速[m/s]} \quad \rho\text{:空気密度[kg/m}^3\text{]} \end{array} \right)$$

C_pはパワー係数であり、これが風車の特性を示すパラメータとなる。また C_pはフィートとマイルで表現されているため、Γを(2.4)式のように補正している。

図 2-2 は周速比λに応じたパワー係数 C_pの特性グラフである。

図 2-2.　風車特性

2-1-3 ピッチ制御系[5][22]

本章では、風力発電機の出力変動による周波数変動を明確にするために、定格風速以上の領域では出力を定格以内に抑え発電機の過負荷を防ぐが、定格風速未満の領域では

最大出力運転を行うだけで、発電機出力変動の補償を行わない従来のピッチ制御系を用いた。

本解析で使用するピッチ制御系を図 2-3 に示す。

図 2-3.　ピッチ制御系

2-1-4 自動電圧調整装置 (Automatic voltage regulator : AVR) [5][21][22]

AVR のモデルを図 2-4 に示す。本論文では全ての AVR にこのモデルを使用した。同期発電機の電圧は、界磁電流によって変化する。このため、定常運転時に電圧を一定に保持するためにこの装置が必要となる。AVR 定数を表 2-3 に示す。

図 2-4.　自動電圧調整装置モデル

表 2-3　自動電圧調整装置定数

Gain K_A [pu]	400
Time Constant T_A [sec]	0.02

2-1-5 負荷周波数制御 (LFC) [5][22]

LFC は周波数偏差を検知すると各発電プラントに対し発電出力を変更するように出力変更指令を発する。これにより、各発電プラントの調速機の出力指令値が変わり発電出力が変更される。LFC のブロック線図を図 2-5 に示す。

LFC は比較的周期の長い変動を抑制する制御なので周波数偏差を LPF に入力し、短い周期の変動を取り除いた。また、LPF の周期は 200[s]（周波数は 0.005[Hz]）とし、PI 制御のゲインと積分時定数は発電機起動時に不安定にならないよう調整した。

図 2-5　LFC システム

2-1-6 調速機モデル[5][20][22]

同期発電機の調速機は図 2-6,　図 2-7 のようなモデルを使用し、SG1, SG2 の調速機は（一定運転 + LFC)、SG3 の調速機はガバナフリー (G.F)運転、SG4 の調速機はロードリミット(L.L)運転となるよう設定した。ただし、LFC 発電機である SG1,SG2 の Sg (回転数偏差［pu］)は（一定運転 + LFC）にするため 0 とした。

図 2-6.　水力発電機用調速機

図 2-7.　火力、原子力発電機用調速機

図 2-6，2-7 において、

Sg:回転数偏差［pu］，65M:負荷設定(初期出力値) [pu]

77M:負荷制限(65M + 定格 MW 出力 × PLM[%]),

PLM:ガバナ運転余裕[%] (定格[MW]出力に対する割合), Pm:タービン出力[pu].

ここで、本解析では G.F 運転の SG3 の PLM を 5[%]とし、L.L 運転の SG4 の PLM を-20 [%]にしている。SG1, SG2, SG3, SG4 の 65M,77M の値を表 2-4 に示す。

表 2-4. 65,77M の値

<table>
<tr><td rowspan="2">IG[MVA]
(Total)</td><td rowspan="2">Load[MVA]</td><td colspan="3">SG1(Hydro)</td><td colspan="3">SG2(Thermal)</td></tr>
<tr><td>Frequency control</td><td>65M</td><td>77M</td><td>Frequency control</td><td>65M</td><td>77M</td></tr>
<tr><td>3</td><td rowspan="3">100</td><td rowspan="3">LFC</td><td rowspan="3">LFC signal</td><td rowspan="3">1</td><td rowspan="6">LFC</td><td rowspan="6">LFC signal</td><td rowspan="6">1</td></tr>
<tr><td>5</td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
<tr><td>3</td><td rowspan="3">60</td><td colspan="3" rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>5</td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IG[MVA]
(Total)</td><td rowspan="2">Load[MVA]</td><td colspan="3">SG3(Thermal)</td><td colspan="3">SG4(Nuclear)</td></tr>
<tr><td>Frequency control</td><td>65M</td><td>77M</td><td>Frequency control</td><td>65M</td><td>77M</td></tr>
<tr><td>3</td><td rowspan="3">100</td><td rowspan="6">G.F</td><td rowspan="3">0.8</td><td rowspan="3">0.84</td><td rowspan="6">L.L</td><td rowspan="6">0.96</td><td rowspan="6">0.8</td></tr>
<tr><td>5</td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
<tr><td>3</td><td rowspan="3">60</td><td rowspan="3">0.4</td><td rowspan="3">0.42</td></tr>
<tr><td>5</td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
</table>

ここで、ガバナフリー (G.F) 運転について説明する。

初期出力値（=負荷設定値 65M）に対して、定格 MW×PLM / 100 までに G.F よる出力増加が可能となる。すなわち、

負荷設定(65M) = 初期出力値

負荷制限器(77M) = 65M + 定格 MW 出力×PLM[%]

となる。

次に、ロードリミット(L.L)運転について説明する。

PLM を負で入力すると

負荷設定(65M) = 初期出力値+ 定格 MW 出力×|PLM[%]|

負荷制限器(77M) = 初期出力値

と設定され、ロードリミット運転となり定出力運転ができる。

2-2 シミュレーション条件

同期発電機と誘導発電機（一定風速で運転）の運転が計算上安定した状態に移行した後に図 2-8 のような変動風速を入力する。本解析で使用する風速データは北海道の利尻島で測定されたものである。また、風力発電機容量と負荷の容量を変えた時の系統周波数への影響を調査するため、表 2-5 に示す 6 パターンでシミュレーションを実行した。なお、シミュレーション時間は 600[sec]とし、軽負荷の Case-4-6 は水力発電機 SG1 を停止させている。

図 3-8.　風速

表 2-5.　シミュレーションパターン

	Load[MVA]	IG[MVA](Total)	SG1[MVA]	SG2[MVA]	SG3[MVA]	SG4[MVA]
Case-1	100	3	20	20	30	30
Case-2		5				
Case-3		10				
Case-4	60	3				
Case-5		5				
Case-6		10				

2-3 シミュレーション結果

2-3-1 重負荷時(100[MVA])の結果

シミュレーション結果を図 2-9 に示す。ここで負荷を 100[MVA]（重負荷）とした。ウインドファーム出力は図 2-9 の(b)のようになった。風力発電機 IG1~IG5 のピッチ角度の変化を図 2-9 の(c)に示す。LFC 発電機(SG1,SG2)は比較的周期の長いウインドファーム出力変動を吸収しようと全体的に緩やかに変動しており、図 2-9 の(d)、(e)に示す。G.F 発電機(SG3)は瞬間的なウインドファーム出力変動に対応しており、図 2-9 の

(f)に示す。原子力発電機 SG4 は L.L としているので出力はほぼ一定であり、図 2-9 の(g)に示す。系統周波数は風力発電機の容量が大きくなるほど大きく変動しており、図 2-9 の(a)に示す。

(a). 系統周波数(Case-1~3)

(b). ウインドファーム出力（Case-1~3）

(c). 各風力発電機 IG1~IG5 のピッチ角

(d). 水力発電機出力：SG1(LFC) (Case-1~3)

(e). 火力発電機出力：SG2(LFC) (Case-1~3)

(f). 火力発電機出力：SG3(G.F) (Case-1~3)

(g). 原子力発電機出力：SG4(L.L) (Case-1~3)

図 2-9. シミュレーション結果 I (Case-1~3)

2-3-2 軽負荷時(60[MVA])の結果

軽負荷時のシミュレーション結果を図 2-10 に示す。ここで負荷を 60[MVA](軽負荷)とした。ウインドファームの出力を図 2-10 の(b)に示す。火力、原子力発電機の動作は Case-1-3 と同様であり、出力を図 2-10 の(c)~(e)に示す。軽負荷時水力発電機 SG1 は停止されている。軽負荷なので変動を吸収する能力が低下しウインドファームの容量が 5[MVA],10[MVA]の時は周波数の変動が激しいことが図 2-10 の(a)より確認できる。しかし、ウインドファームの容量が 3[MVA]の時の周波数変動は低負荷と重負荷とではあまり変化しておらず、変動も 0.1[Hz]程度となっている。

(a). 系統周波数(Case-4~6)

(b). ウインドファーム出力 (Case-4~6)

(c). 火力発電機出力：SG2(LFC) (Case-4~6)

(d). 火力発電機出力：SG3(G.F) (Case-4~6)

(e). 原子力発電機出力：SG4(L.L) (Case-4~6)

図 2-10. シミュレーション結果Ⅱ(Case-4~6)

2-4 まとめ

本章では、風力発電機の出力変動による周波数変動を明確にするために、定格風速以上では出力を定格以内に抑えるだけのピッチ制御系を用いて検討した。周波数変動の許容範囲は基準周波数(50[Hz])から±0.2[Hz]以内とした。周波数変動を±0.2[Hz]以内にできなかったのは、重負荷時で Case-3、軽負荷時で Case-5 と Case-6 となった。ウインドファーム容量が 10[MVA](系統容量の 10%)になると周波数変動を±0.2[Hz]以内にすることは難しいといえる。特に軽負荷時では、容量が 5[MVA]でも大きな周波数変動が見られた。その結果、軽負荷時を考慮した場合、系統容量に対して約 3%の風力発電しか導入できないことがわかった。今後は定格風速以上だけではなく定格風速未満の領域でも出力変動を補償するピッチ制御を用いて検証する必要がある。次の第 3 章では SMA と EMA ピッチ制御に関して検討する。

第3章　風力発電機のピッチ角制御による電力系統の周波数変動抑制に関する検討(I)

近年、地球温暖化や化石燃料の枯渇の問題は年々深刻さを増している。そのため、再生可能なクリーンエネルギーとして、自然エネルギーが注目を集めている。風力発電は、風力によって発電機を回して発電する方式である。風力エネルギーは、再生可能エネルギーの 1 つである。地球環境の保全、エネルギーセキュリティの確保、経済成長の維持を同時に実現可能なエネルギー源として、世界各地で普及が進んでいる。風力発電は技術革新による発電機大型化による設置コストの低減、発電効率の良さ、導入補助などの後押しを受け、急速に拡大している。

しかし、風力発電は風況により出力が変動し、導入量の増大とともに連系する電力系統に周波数変動や電圧変動などの悪影響を与えることが懸念されている。特に、周波数変動の問題は、負荷が軽くなり電力系統の調整能力が小さくなる深夜に顕著である。このような背景から一部の地域では風力発電機の導入に制限を設けているのが現状であり、今後の風力発電の導入増加に伴う電力系統の品質（特に周波数）維持のためには、出力変動対策が欠くことのできない重要な課題となっている。

一般に、固定速風力発電機において、風速が定格以上の領域では、ある程度の風を逃して発電機出力を定格に維持するようなピッチ制御系が備えられているが、定格風速以下の領域ではピッチ角を 0 度(最小)に固定して最大出力運転をするため、出力変動が大きくなってしまう。そこで、定格風速以下の領域においてもピッチ制御を動作させることで出力の平滑化を図り、系統周波数を安定化させる EMA に基づくピッチ制御に関する検討結果を本章で示す。

3-1　モデル系統[5]

本解析で用いたモデル系統を図 3-1 に示す。風力発電機 5 機から成るウィンドファーム(WF)と水力発電機 1 機、火力発電機 2 機、原子力発電機 1 機と負荷から成り、IG は風力発電機としての誘導発電機(IGn, n=1,2,,,,5)で、SG1 は水力発電機(LFC)、SG2(LFC)と SG3(ガバナフリー運転, G.F) は火力発電機、SG4 は原子力発電機(ロードリミット運転, L.L)としての同期発電機である。また、WF に並列コンデンサ Xc を設置し、誘導機の無効電力消費を補償している。さらに、送電線のインピーダンス等で低下した電圧を補うため並列コンデンサ Qc を負荷端子に設置した。誘導機モデルとして普通かご形、同期機モデルとして SG1 は突極形、SG2,SG3,SG4 は円筒形を用いた。ただし、誘導機、同期機の磁気飽和は考慮していない。発電機定数を表 3-1 に、初期運転条件を表 3-2 に

示す。なお、このモデルは第 2 章で用いたものと同じであるが、第 3 章では、ウインドファームの容量は 5[MVA]と 10[MVA]のみにして解析を行った。調速機モデル、LFC モデルも第 2 章と同じであり、説明は省略する。

図 3-1.　モデル系統

表 3-1.　発電機定数

Induction Generator			Synchronous Generator				
	Squirrel cage type (IG)			Salient pole type (SG1)	Cylindrical rotor type		
					SG2	SG3	SG4
MVA(each)	1	2	MVA	20	20	30	30
R_1 [pu]	0.01		Xd [pu]	1.2	2.11		
X_1 [pu]	0.18		Xq [pu]	0.7	2.02		
X_{mu} [pu]	10		2H [sec]	2.5	2.32		
R_2 [pu]	0.015						
X_2 [pu]	0.12						
2H [sec]	1.5						

表 3-2.　初期運転条件

	WF	SG1	SG2,SG3,SG4
P	1.00	1.00	1.00
V	1.05	1.05	1.05
Q	0.00	-	-
s(Slip)	-1.733%	-	-

(Self capacity base)

3-2　従来のピッチ制御系[5][22]

本章では、比較検討のため、従来のピッチ制御系による解析も行った。その制御系モデルを図 3-2 に示す。風力発電機出力を定格出力以内に抑制しようとする一般的なピッチ制御は、定格風速(本論文で扱う風車モデルの定格風速は 11.9[m/s])未満の領域では、ブレードピッチ角を固定して最大出力運転をするだけで出力変動補償の対策が行われていない。図 3-2 のモデルはピッチ角の動作をより現実に近づけるため、駆動系のゲインやレートリミッターの時定数を第 2 章で用いたものより厳しく設定した。

図 3-2　従来のピッチ制御系

3-3　SMA と EMA ピッチ制御[5]

従来のピッチ制御は、定格風速以下の領域では、ブレードピッチ角を固定して最大出力運転をするだけで、出力変動補償の対策は一切行なわない。そこで、本章では定格風速以下の領域も考慮し、出力変動を補償することで、系統周波数を安定させる新たなピッチ制御系を用いて検討する。新制御系を図 3-3 に示す。

図 3-3　新しいピッチ制御系

新ピッチ制御系は風速の移動平均を算出し、そのデータから風力発電機出力の目標値を決定することで風力発電機出力の平滑化を図るという方法である。移動平均としては、単純移動平均（SMA）と指数移動平均（EMA）の 2 つを用い、風力発電機出力の平滑化やエネルギー損失の大きさ等を比較検討する。

3-3-1 単純移動平均（SMA）

単純移動平均（SMA）は直近の n 個のデータの重み付け（Average weight）が全て等しい平均である。次の単純移動平均を求めるには、新たな終値を加え、一番古い値を除けばよく、改めて総和を求めなおす必要はない(式 3.1 参照)。その重み付けを図 3-4 に示す。

単純移動平均（SMA）

$$\overline{Vw_n} = \frac{Vw_0 + Vw_1 + \ldots + Vw_{n\text{-}1}}{n} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.1)$$

図 3-4　SMA の重み付け

3-3-2 指数移動平均（EMA）

指数移動平均（EMA）の式は複雑であるが(式 3.2 参照)、直近のデータにより大きな比重をおくので追従性がよく、単純移動平均(SMA)を用いた場合と比べ、発電機の出力は平滑化されつつも、エネルギー損失は小さくなることが期待できる。重み付けは図 3-5 に示される。

指数移動平均（EMA）

$$\overline{Vw_n} \;=\; Vw_n \times k + \overline{Vw_{n-1}} \times (1\text{-}k) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.2)$$

$$k \;=\; \frac{2}{n+1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.3)$$

以上の移動平均を用いて発電機出力と発電機出力目標値は次式で表現される。

$$P = \frac{1}{2}\rho A Vw^3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.4)$$

$$P_{ref} = \frac{1/2\rho A \overline{Vw_n}^3}{1/2\rho A (11.9)^3} = \left(\frac{\overline{Vw_n}}{11.9}\right)^3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5)$$

$\left(\begin{array}{l} \overline{Vw_n}: \text{平均風速} \qquad n\text{:データの個数}(n = 20) \quad P\text{:発電機出力[W]} \\ P_{ref}: \text{発電量目標値[pu]} \quad 11.9: \text{定格風速[m/s]} \end{array}\right)$

図 3-5.　EMA の重み付け

新ピッチ制御系では、風速データのサンプリング間隔は 6 秒とし、データ個数（n）を 20 として 120 秒間の風速の移動平均を計算している。発電機出力は式(3.4)のように表されるので、発電機出力目標値は式(3.5)となる。なお、EMA の初期値には SMA が用いられる。また、k は初期値を算出する際のデータの個数により決定される。

3-4 シミュレーション条件

同期発電機と誘導発電機（一定風速で運転）の運転が計算上安定した状態に移行した後に図 3-6 のような変動風速を入力する。また、風力発電機容量、負荷容量、ピッチ制御の方法それぞれを変えた時の系統周波数への影響を調査するため、表 3-3 に示す 12 パターンでシミュレーションを実行した。なお、シミュレーション時間は 600[sec]とし、軽負荷時は水力発電機 SG1 を停止している。

図 3-6.　風速

表 3-3.　シミュレーションパターン

	IG(Total)[MVA]	Load[MVA]	Pitch controller
Case-1	5	100	conventional
Case-2			(SMA)
Case-3			(EMA)
Case-4		60	conventional
Case-5			(SMA)
Case-6			(EMA)
Case-7	10	100	conventional
Case-8			(SMA)
Case-9			(EMA)
Case-10		60	conventional
Case-11			(SMA)
Case-12			(EMA)

3-5 シミュレーションの結果

3-5-1 ウインドファーム容量 5[MVA]、負荷 100[MVA]時の結果

シミュレーションの結果を図 3-7 に示す。ここでウインドファームの容量を 5[MVA]、負荷を 100[MVA]（重負荷）とした。風力発電機 IG1 の風速、SMA、EMA およびピッチ角と出力電力状況は図 3-7 の(g)~(j)に示す。図 3-7 の(h)より、従来のピッチ制御は定格風速(11.9[m/s])未満の領域ではピッチ角は動作していないが、SMA や EMA を用いる新しいピッチ制御系は定格風速未満でピッチ角駆動系が動作していることが確認できる。

図 3-7 の(i)、(j)から風速の移動平均から IG1 の目標出力値を求め、発電機出力が平滑化されているのが確認できる。

各同期発電機の動作を図 3-7 の(c)~(f)に示し、第 2 章と同様なので説明は省略する。

図 3-7 の(b)に示すウインドファーム出力は、風速の影響を受け若干変動しているものの、平滑化され(EMA 制御系は SMA 制御系よりウインドファーム出力が少し大きく見える)、図 3-7 の(a)の周波数変動も従来のピッチ制御系を用いたものより小さくなっている。

(a). 系統周波数(Case-1~3)

(b). ウインドファーム出力（Case-1~3)

(c). 水力発電機出力：SG1(LFC) (Case-1~3)

(d). 火力発電機出力：SG2(LFC) (Case-1~3)

(e). 火力発電機出力：SG3(G.F) (Case-1~3)

(f). 原子力発電機出力：SG4(L.L) (Case-1~3)

(g). 風力発電機 IG1 の風速 とその SMA と EMA(Case-1~3)

(h). 風力発電機 IG1 のピッチ角

(i). 風力発電機 IG1 の出力（Case-1~3）

(j). 風力発電機 IG1 の出力目標値:

図 3-7. シミュレーション結果 I (Case-1~3)

3-5-2 ウインドファーム容量 5[MVA]、負荷 60[MVA]時の結果

シミュレーションの結果を図 3-8 に示す。ここでウインドファームの容量を 5[MVA]、負荷を 60[MVA]（軽負荷）とした。軽負荷により条件が厳しくなったが、周波数の変動は、重負荷の場合と比べると少し変動しており、結果を図 3-8 の(a)に示す。

各同期発電機の動作を図 3-8 の(c)~(e)に示し、第 2 章と同様なので説明は省略する。

図 3-8 の(b)に示すウインドファーム出力は、風速の影響を受け若干変動しているものの、平滑化されている(EMA 制御系は SMA 制御系よりウインドファーム出力が少し大きく見える)。

(a). 系統周波数(Case-4~6)

(b). ウインドファーム出力（Case-4~6)

(c). 火力発電機出力：SG2(LFC) (Case-4~6)

(d). 火力発電機出力：SG3(G.F) (Case-4~6)

(e). 原子力発電機出力：SG4(L.L) (Case-4~6)

図 3-8. シミュレーション結果Ⅱ(Case-4~6)

3-5-3 ウインドファーム容量 10[MVA]、負荷 100[MVA]時の結果

シミュレーションの結果を図 3-9 に示す。ここでウインドファームの容量を 10[MVA]、負荷を 100[MVA]（重負荷）とした。

図 3-9 の(b)に示すウインドファーム出力は、風速の影響を受け若干変動しているものの、平滑化され(EMA 制御系は SMA 制御系よりウインドファーム出力が少し大きく見える)、図 3-9 の(a)の周波数変動も従来のピッチ制御系を用いたものより小さくなっている。ウインドファームの容量が大きくなったことに伴い、周波数変動も若干大きくなっている。

各同期発電機の動作を図 3-9 の(c)~(e)に示し、第 2 章と同様なので説明は省略する。

(a). 系統周波数(Case-7~9)

(b). ウインドファーム出力 (Case-7~9)

(c). 水力発電機出力：SG1(LFC) (Case-7~9)

(d). 火力発電機出力：SG2(LFC) (Case-7~9)

(e). 火力発電機出力：SG3(G.F) (Case-7~9)

(f). 原子力発電機出力：SG4(L.L) (Case-7~9)

図 3-9. シミュレーション結果Ⅲ(Case-7~9)

3-5-4 ウインドファーム容量 10[MVA]、負荷 60[MVA]時の結果

シミュレーションの結果を図 3-10 に示す。ここでウインドファームの容量を 10[MVA]、負荷を 60[MVA]（軽負荷）とした。図 3-10 の(a)に示すように、軽負荷により条件が厳しくなり、周波数変動は重負荷の場合と比べて更に大きくなっており、従来のピッチ制御系を用いた場合は 0.2[Hz]を大きく越えているが、EMA ピッチ制御では 0.2[Hz]以内に抑えられている。

図 3-10 の(b)に示すウインドファーム出力は、風速の影響を受け若干変動しているものの、平滑化されている(EMA 制御系は SMA 制御系よりウインドファーム出力が少し大きく見える)。

各同期発電機の動作を図 3-10 の(c)~(e)に示し、第 2 章と同様なので説明は省略する。

(a). 系統周波数(Case-10~12)

(b). ウインドファーム出力（Case-10~12）

(c). 火力発電機出力：SG2(LFC) (Case-10~12)

(d). 火力発電機出力：SG3(G.F) (Case-10~12)

(e). 原子力発電機出力：SG4(L.L) (Case-10~12)

図 3-10. シミュレーション結果Ⅳ(Case-10~12)

3-6 まとめ

本章では、風力発電機出力変動の平滑化を目的として新しい EMA ピッチ制御系を提案し、電力系統の周波数調整能力を考慮した系統モデルを用いて、その有効性に関して、従来のピッチ制御系も考慮の上、比較検討を行った。シミュレーション結果を評価するにあたり、周波数変動の許容範囲は基準周波数(50[Hz])から±0.2[Hz]以内とした。各ケースの最大周波数偏差は表 3-4 に示。すウインドファームの容量が 10[MVA] (系統容量の 10%)の場合には、従来のピッチ制御系では周波数変動を±0.2[Hz]以内にできなかった。これより、ウインドファーム容量が系統容量の 10%程度以上になると、従来のピッチ制御系では出力変動の補償が必要になる可能性が高い。一方、新しいピッチ制御系の場合にはどのケースでも±0.2[Hz]以内に周波数変動を抑えることができているが、Case-9 と Case-12 の周波数変動は、かろうじて 0.2[Hz]以内に収まっている。

以上により、従来のピッチ制御系では風力発電機容量が系統容量に比較して 10%程度と大きくなった場合に、周波数変動が許容範囲を超える。一方、EMA 制御系では許容範囲内に収まり、出力変動の平滑化が有効に動作することを確認した。さらに変動の激しい風速の場合などの厳しい条件を考慮すると、提案した EMA ピッチ制御でも周波数変動を 0.2[Hz]以内に抑えることができない場合も想定される。それで、次章では更に周波数変動を抑制するための新しい LPF ピッチ制御系に関して検討する。

表 3-4. 最大周波数偏差 Max(|f-50|)Hz

	IG(Total)[MVA]	Load[MVA]	Pitch controller	最大周波数偏差 Max(|f_{load}-50|)[Hz]
Case-1	5	100	conventional	0.14618
Case-2			(SMA)	0.06899
Case-3			(EMA)	0.06799
Case-4		60	conventional	0.16266
Case-5			(SMA)	0.08338
Case-6			(EMA)	0.08034
Case-7	10	100	conventional	0.29790
Case-8			(SMA)	0.13890
Case-9			(EMA)	0.13716
Case-10		60	conventional	0.54639
Case-11			(SMA)	0.20222
Case-12			(EMA)	0.18824

第4章　風力発電機のピッチ角制御による電力系統の周波数変動抑制に関する検討 (II)

本章では、第 3 章と同じモデル系統を用いて、更に周波数変動を抑制するための新しいピッチ制御系に関する検討を行う。ウインドファーム容量と負荷容量（系統容量 100[MVA]に対して重負荷 100[MVA]と軽負荷 60[MVA]の 2 条件）の条件を変えることにより周波数にどのような影響を与えるかを電力系統解析ソフト PSCAD/EMTDC を用いて検討する。

4-1 シミュレーションモデル

4-1-1 モデル系統[5]

本章で用いたモデル系統を図 4-1 に示す。風力発電機 5 機から成るウインドファーム WF と水力発電機 1 機、火力発電機 2 機、原子力発電機 1 機と負荷から成り、IG は風力発電機としての誘導発電機(IGn, n=1,2,,,,5)で、SG1 は水力発電機(LFC)、SG2(LFC)と SG3(ガバナフリー運転, G.F) は火力発電機、SG4 は原子力発電機(ロードリミット運転, L.L)としての同期発電機である。

また、WF に並列コンデンサ Xc を設置し、誘導機の無効電力消費を補償している。さらに、送電線のインピーダンス等で低下した電圧を補うため並列コンデンサ Qc を負荷端子に設置した。誘導機モデルとして普通かご形、同期機モデルとして SG1 は突極形、SG2,SG3,SG4 は円筒形を用いた。ただし、誘導機、同期機の磁気飽和は考慮していない。発電機定数を表 4-1、初期運転条件を表 4-2 に示す。

表 4-1.　系統の発電機定数

Induction Generator			Synchronous Generator				
	Squirrel cage type (IG)			Salient pole type (SG1)	Cylindrical rotor type		
					SG2	SG3	SG4
MVA (each)	1	2	MVA	20	20	30	30
R_1 [pu]	0.01		Xd [pu]	1.2	2.11		
X_1 [pu]	0.18		Xq [pu]	0.7	2.02		
X_{mu} [pu]	10		2H [sec]	2.5	2.32		
R_2 [pu]	0.015						
X_2 [pu]	0.12						
2H [sec]	1.5						

表 4-2.　系統の初期運転条件

	WF	SG1	SG2,SG3,SG4
P	1.00	1.00	1.00
V	1.05	1.05	1.05
Q	0.00	-	-
s(Slip)	-1.733%	-	-

(Self capacity base)

図 4-1.　モデル系統

4-1-2 自動電圧調整装置 (Automatic voltage regulator : AVR) [5][21]

AVR のモデルを図 4-2 に示す。本章では全ての AVR にこのモデルを使用した。同期発電機の電圧は、界磁電流によって変化する。このため、定常運転時に電圧を一定に保持するためにこの装置が必要となる。AVR 定数を表 4-3 に示す。

図 4-2.　自動電圧調整装置モデル

表 4-3　自動電圧調整装置定数

Gain K_A [pu]	400
Time Constant T_A [sec]	0.02

4-1-3 負荷周波数制御 (LFC) [5][22]

LFC は周波数偏差を検知すると各発電プラントに対し発電出力を変更するように出力変更指令を発する。これにより、各発電プラントの調速機の出力指令値が変わり発電出力が変更される。本章で使用した LFC のブロック線図を図 4-3 に示す。

LFC は比較的周期の長い変動を抑制する制御なので周波数偏差を LPF に入力し、短い周期の変動を取り除いた。また、LPF の周期は 200[s]（周波数は 0.005[Hz]）とし、PI 制御のゲインと積分時定数は発電機起動時に不安定にならないよう調整した。

図 4-3　LFC システム

4-1-4 調速機モデル[5][20][22]

同期発電機の調速機は第 2 章と同じ図 4-4, 図 4-5 のようなモデルを使用し、SG1, SG2 の調速機は（一定運転 + LFC）、SG3 の調速機はガバナフリー (G.F)運転、SG4 の調速機はロードリミット(L.L)運転となるよう設定した。ただし、LFC 発電機である SG1,SG2 の Sg (回転数偏差［pu］)は（一定運転 +LFC）にするため 0 とした。

図 4-4.　水力発電機用調速機

図 4-5.　火力・原子力発電機用調速機

図 4-4，4-5 において、

Sg:回転数偏差［pu］，65M:負荷設定(初期出力値) [pu]

77M:負荷制限(65M + 定格 MW 出力 × PLM[%]),

PLM:ガバナ運転余裕[%] (定格[MW]出力に対する割合)，Pm:タービン出力[pu].

ここで、本解析では G.F 運転の SG3 の PLM を 5[%]とし、L.L 運転の SG4 の PLM を -20 [%]にしている。SG1, SG2, SG3, SG4 の 65M,77M の値を表 4-4 に示す。

表 4-4.　65M,77M の値

<table>
<tr><td rowspan="2">IG[MVA]
(Total)</td><td rowspan="2">Load[MVA]</td><td colspan="3">SG1(Hydro)</td><td colspan="3">SG2(Thermal)</td></tr>
<tr><td>Frequency control</td><td>65M</td><td>77M</td><td>Frequency control</td><td>65M</td><td>77M</td></tr>
<tr><td>5</td><td rowspan="2">100</td><td rowspan="2">LFC</td><td rowspan="2">LFC signal</td><td rowspan="2">1</td><td rowspan="4">LFC</td><td rowspan="4">LFC signal</td><td rowspan="4">1</td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
<tr><td>5</td><td rowspan="2">60</td><td colspan="3" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IG[MVA]
(Total)</td><td rowspan="2">Load[MVA]</td><td colspan="3">SG3(Thermal)</td><td colspan="3">SG4(Nuclear)</td></tr>
<tr><td>Frequency control</td><td>65M</td><td>77M</td><td>Frequency control</td><td>65M</td><td>77M</td></tr>
<tr><td>5</td><td rowspan="2">100</td><td rowspan="4">G.F</td><td rowspan="2">0.8</td><td rowspan="2">0.84</td><td rowspan="4">L.L</td><td rowspan="4">0.96</td><td rowspan="4">0.8</td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
<tr><td>5</td><td rowspan="2">60</td><td rowspan="2">0.4</td><td rowspan="2">0.42</td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
</table>

4-2 ピッチ制御系[5][22]

4-2-1　EMA ピッチ制御系

EMA ピッチ制御系は、風速の指数移動平均(EMA)を算出し、そのデータから風力発電機出力の目標値を決定することで風力発電機出力の平滑化を図るという方法である 。EMA ピッチ制御モデルは第 4 章と同じなので、ここで説明は省略する、

4-2-2　新 LPF ピッチ制御

第 3 章で提案されている EMA ピッチ制御系に対して本章では図 4-6 に示す新しいピッチ制御系を提案する。提案手法では、図 4-7 に示すように、風速を MOD2 風車のモデリング式に代入して出力P_nを算出する。続いて、5 台分の出力(P1、P2、P3、P4、P5)をまとめて、ローパスフィルタ (LPF)を用いて 5 台の総有効電力目標値P_{ref}を算出する。最後に、Pref を式(4.5)式により 5 台の風車に分割し、発電機それぞれの目標値P_{refn}を算出する。この方法は、EMA ピッチ制御系の場合と比べ、発電機の出力は平滑化されても、エネルギー損失は大きくならないことが期待できる。

図 4-6.　LPF ピッチ制御系

図 4-7.　出力目標値 Prefn の算出モデル

MOD-2 風車のモデリング式は以下のように表現できる[19][20]。

$$P_{wtb} = \frac{1}{2}\rho C_P(\lambda)\pi R^2 V_w^{\ 3} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{wtb} R}{V_w} \cdots\cdots (4.2)$$

$$C_P(\lambda) = 0.5(\Gamma - 0.022\beta^2 - 5.6)e^{-0.17\Gamma} \cdots\cdots (4.3)$$

$$\Gamma = \frac{R}{\lambda} \cdot \frac{3600}{1609} \cdots\cdots (4.4)$$

$$\left(\begin{array}{lll} P_{wtb}:\text{風車出力[W]} & \lambda:\text{周速比} & R:\text{風車半径[m]} \\ \omega_{wtb}:\text{風車角速度[rad/s]} & \beta:\text{ブレードピッチ角[deg]} & \\ V_w:\text{風速[m/s]} & \rho:\text{空気密度[kg/m}^3\text{]} & \end{array} \right)$$

P_{ref}の分割方法は式次のように表される

$$P_{refn} = P_{refn} \times \frac{P_n}{P_1+P_2+P_3+P_4+P_5} - (1 - P_{sum(pu)}) \times \frac{P_n}{P_1+P_2+P_3+P_4+P_5} \cdots\cdots (4.5)$$

4-3 シミュレーション条件

同期発電機と誘導発電機（一定風速で運転）の運転が計算上安定した状態に移行した後に図 4-8 のような変動風速を入力する。続いて、風力発電機容量と負荷容量が系統周波数へ及ぼす影響を調査するため、表 4-5 に示す 8 パターンでシミュレーションを実行した。なお、シミュレーション時間は 600[sec]とし、軽負荷の Case-3, 4, 7, 8 では水力発電機 SG1 を停止させている。

図 4-8.　風速データ

表 4-5.　シミュレーションパターン

	IG(Total)[MVA]	Load[MVA]	Pitch controller
Case-1	5	100	(EMA)
Case-2			(LPF)
Case-3		60	(EMA)
Case-4			(LPF)
Case-5	10	100	(EMA)
Case-6			(LPF)
Case-7		60	(EMA)
Case-8			(LPF)

4-4 シミュレーション結果

4-4-1 ウインドファーム容量 5[MVA]、負荷 100[MVA]時の結果

シミュレーション結果を図 4-9 に示す。ここでウインドファームの容量を 5[MVA]、負荷を 100[MVA]（重負荷）とした。LPF ピッチ制御のウインドファーム出力は、結果を図 4-9 の(b)に示してあるが、風速の影響を受け若干変動しているものの平滑化され、EMA 制御より出力が大きくなっている。また、周波数変動を図 4-9 の(a)に示す。EMA ピッチ制御系を用いた結果と比べると LPF ピッチ制御系の変動が僅かであるが小さくなっている。風力発電機 IG1 のピッチ角、出力目標値と出力の変動を図 4-9 の(c)~(e)に示す。

(a).　系統周波数(Case-1,2)

(b). ウインドファーム出力（Case-1,2）

(c). 風力発電機 IG1 のピッチ角(Case-1,2)

(d). 風力発電機 IG1 の出力(Case-1,2)

(e). 風力発電機 IG1 の出力目標値:Pref1(Case-1,2)

図 4-9. シミュレーション結果 I (Case-1、2)

4-4-2 ウインドファーム容量 5[MVA]、負荷 60[MVA]時の結果

シミュレーション結果を図 4-10 に示す。ここでウインドファームの容量を 5[MVA]、負荷を 60[MVA]（軽負荷）とした。軽負荷により条件が厳しくなったが、周波数の変動は、重負荷の場合と比べると少し変動しており、EMA ピッチ制御系の周波数変動と比べると LPF ピッチ制御系の変動が小さくなっている。結果を図 4-10 の(a)に示す。LPF ピッチ制御のウインドファーム出力は、風速の影響を受け若干変動しているものの、平滑化され、EMA 制御より出力が大きくなった。結果を図 4-10 の(b)に示す。

(a). 系統周波数(Case-3,4)

(b). ウインドファーム出力（Case-3,4）

図 4-10. シミュレーション結果Ⅱ(Case-3,4)

4-4-3 ウインドファーム容量 10[MVA]、負荷 100[MVA]時の結果

シミュレーション結果を図4-11に示す。ここでウインドファームの容量を10[MVA]、負荷を100[MVA]（重負荷）とした。図4-11の(b)に示すように、LPFピッチ制御のウインドファーム出力は、風速の影響を受け若干変動しているものの平滑化され、EMA制御より出力が大きくなっている。また、周波数変動を図4-11の(a)に示す。EMAピッチ制御系を用いた結果と比べるとLPFピッチ制御系の変動が小さくなっている。

(a). 系統周波数(Case-5,6)

(b). ウインドファームの出力（Case-5,6）

図 4-11. シミュレーション結果Ⅲ(Case-5,6)

4-4-4 ウインドファーム容量 10[MVA]、負荷 60[MVA]時の結果

シミュレーション結果を図4-12に示す。ここでウインドファームの容量を10[MVA]、負荷を 60[MVA]（軽負荷）とした。軽負荷により条件が厳しくなったが、図 4-12 の(a)に示すように、周波数の変動は重負荷の場合と比べると少し変動しており、EMA ピッチ制御系の周波数変動と比べると LPF ピッチ制御系の変動が小さくなっている。LPF ピッチ制御のウインドファーム出力は、風速の影響を受け若干変動しているものの、平滑化され、EMA 制御系より出力大きくなった。結果を図 4-12 の(b)に示す。

(a). 系統周波数(Case-7,8)

(b). ウインドファーム出力（Case-7,8）

図 4-12. シミュレーション結果Ⅳ(Case-7,8)

4-5 まとめ

本章では、出力変動を補償する新しい LPF ピッチ制御系を提案し、その有効性に関して検討した。電気事業法で定められる周波数の許容変動範囲は±0.2[Hz]である。これをもとに、シミュレーション結果を評価すると Case-1～Case-8 はすべて±0.2[Hz]以内に周波数変動を抑えることができているが、最大周波数偏差(|f-50|)から見ると(表 4-6 に示す)、新 LPF ピッチ制御系は EMA 制御系より周波数変動が小さくなっていることを確認した。今後は、大電力系統の容量を大きくする、風力発電機容量が 10%以上で軽負荷などの厳しい条件での周波数変動を検討に加える。

表 4-6. 最大周波数の偏差 Max(|f-50|)Hz

	最大周波数の偏差 Max(|f-50|)[Hz]	Pitch controller
Case-1	0.068	(EMA)
Case-2	0.064	(LPF)
Case-3	0.080	(EMA)
Case-4	0.079	(LPF)
Case-5	0.138	(EMA)
Case-6	0.126	(LPF)
Case-7	0.189	(EMA)
Case-8	0.126	(LPF)

第 5 章　風力発電機のピッチ角制御による電力系統の周波数変動抑制に関する検討 (III)

本章では、新しい大規模モデル系統を用いて、第 4 章で提案したピッチ制御系を更に改良し、系統への出力目標値の決定に周波数偏差も考慮する新しいピッチ制御系(ドループ制御)を提案し、電力系統解析ソフト PSCAD/EMTDC を用いて検討する。

5-1 シミュレーションモデル

5-1-1 モデル系統[5][23]

本章で用いたモデル系統を図 5-1 に示す。風力発電機 5 機から成るウインドファーム WF と水力発電機 1 機、火力発電機 2 機、原子力発電機 1 機と負荷から成り、IG は風力発電機としての誘導発電機(IGn, n=1,2,,,,5)で、SG1 は水力発電機(LFC)、SG2(LFC)と SG3(ガバナフリー運転, G.F) は火力発電機、SG4 は原子力発電機(ロードリミット運転, L.L)としての同期発電機である。

また、WF に並列コンデンサ Xc を設置し、誘導機の無効電力消費を補償している。さらに、送電線のインピーダンス等で低下した電圧を補うため並列コンデンサ Qc を負荷端子に設置した。誘導機モデルとして普通かご形、同期機モデルとして SG1 は突極形、SG2,SG3,SG4 は円筒形を用いた。ただし、誘導機、同期機の磁気飽和は考慮していない。発電機定数を表 5-1 に初期運転条件を表 5-2 に示す。

表 5-1.　発電機定数

Induction Generator		Synchronous Generator				
	Squirrel cage type (IG1-IG5)		Salient pole type (SG1)	Cylindrical rotor type		
				SG2	SG3	SG4
MVA(each)	20	MVA	200	200	300	300
R_1 [pu]	0.01	Xd [pu]	1.2	2.11		
X_1 [pu]	0.18	Xq [pu]	0.7	2.02		
X_{mu} [pu]	10	H [sec]	5	4		
R_2 [pu]	0.015					
X_2 [pu]	0.12					
2H [sec]	1.5					

表 5-2.　発電機の初期運転条件

	WF	SG1	SG2,SG3,SG4
P	1.00	1.00	1.00
V	1.05	1.05	1.05
Q	0.00	-	-
s(Slip)	-1.733%	-	-

(Self capacity base)

図 5-1.　モデル系統

5-1-2 自動電圧調整装置 (Automatic voltage regulator : AVR) [5][21][22]

AVR のモデルを図 5-2 に示す。本章では全ての AVR にこのモデルを使用した。同期発電機の電圧は、界磁電流によって変化する。このため、定常運転時に電圧を一定に保持するためにこの装置が必要となる。AVR 定数を表 5-3 に示す。

図 5-2.　自動電圧調整装置モデル

表 5-3　自動電圧調整装置定数

Gain K_A [pu]	400
Time Constant T_A [sec]	0.02

5-1-3 負荷周波数制御 (LFC) [5][22]

LFC は周波数偏差を検知すると各発電プラントに対し発電出力を変更するように出力変更指令を発する。これにより、各発電プラントの調速機の出力指令値が変わり発電出力が変更される。LFC のブロック線図を図 5-3 に示す。

LFC は比較的周期の長い変動を抑制する制御なので周波数偏差を LPF に入力し、短い周期の変動を取り除いた。また、LPF の周期は 200[s]（周波数は 0.005[Hz]）とし PI 制御のゲインと積分時定数は発電機起動時に不安定にならないよう調整した。

図 5-3　LFC システム

5-1-4 調速機[5][20][22]

同期発電機の調速機は第 2 章と同じ図 5-4, 図 5-5 のようなモデルを使用し､SG1, SG2 の調速機は（一定運転 + LFC）、SG3 の調速機はガバナフリー (G.F)運転、SG4 の調速機はロードリミット(L.L)運転となるよう設定した。ただし､LFC 発電機である SG1,SG2 の Sg (回転数偏差［pu］)は(一定運転 +LFC）にするため 0 とした。

図 5-4.　水力発電機用調速機

図 5-5.　火力・原子力発電機用調速機

図 5-4，5-5 において、

Sg:回転数偏差［pu］，65M:負荷設定(初期出力値) [pu]

77M:負荷制限(65M + 定格 MW 出力 × PLM[%]),

PLM:ガバナ運転余裕[%] (定格[MW]出力に対する割合)，Pm:タービン出力[pu].

ここで、本解析では G.F 運転の SG3 の PLM を 5[%]とし、L.L 運転の SG4 の PLM を -20 [%]にしている。SG1, SG2, SG3, SG4 の 65M,77M の値を表 5-4 に示す。

表 5-4.　65M,77M の値

SG1(Hydro)			SG2(Thermal)		
Frequency control	65M	77M	Frequency control	65M	77M
LFC	LFC signal	1	LFC	LFC signal	1
SG3(Thermal)			SG4(Nuclear)		
Frequency control	65M	77M	Frequency control	65M	77M
G.F	0.8	0.84	L.L	0.96	0.8

5-2　新ピッチ制御系

本章で提案する新ピッチ制御系(DLP 制御系)では、第 4 章で提案した LFC ピッチ制御系に加え、出力電力目標値の決定に周波数の偏差も考慮する。この新ピッチ制御系を図 5-6 に示す。出力目標値の算出法は第 4 章と同じなので、ここでは説明を省略する。

図 5-6　新ピッチ制御系

負荷周波数偏差、すなわち電力システムの周波数(f_{load})と定格周波数(f_{set} =50 Hz)の間の差をドループ制御に通し、その周波数偏差に対応する電力P_{dif}が算出される。これを第 4 章で提案した出力電力目標値の算出方法により算出した各出力電力目標値P_{refn}に加算し、各発電機の新しい出力電力目標値P_{setn}が算出される。この出力目標値と電力系統への出力電力P_{measn}との差分を取り、PI コントロールとピッチ角制御ブロックを通して、各発電機のピッチ角度を決定する。発電機の出力目標値が系統周波数の偏差に影響され、増加/減少する。(f_{load} > f_{set} の時P_{dif}が”-”になり、P_{setn}を減少させ、系統への出力電力が減少する。結果として系統の周波数を減少させる。)　このように、提案するピッチ制御系は負荷周波数が低い場合には、風力タービンの出力電力を増加させ、高い場合には出力電力を低減することにより負荷周波数変動の制御が実現できる。

5-3 シミュレーション条件

同期発電機と誘導発電機（一定風速で運転）の運転が計算上安定した状態に移行した後に図 5-7 のような変動風速を入力する。従来のピッチ制御法と提案した新ピッチ制御法を用いた二つのパターンでシミュレーションを実行した。なお、シミュレーション時間は 600[sec]とし、電力系統解析ソフト PSCAD / EMTDC を用いて、シミュレーションを実行する。

図 5-7　風速データ

5-4 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 5-9~図 5-11 に示す。"DLP pitch"が提案した新ピッチ制御系であり、Conventional pitch が従来のピッチ制御系である。風力タービンのピッチ角の応答を図 5-9 の(a)~(e)に示す。図 5-10 はウインドファームの出力電力を示す。図 5-11 は電力系統の周波数を示す。

(a).　IG1 のピッチ角

(b). IG2 のピッチ角

(c). IG3 のピッチ角

(d). IG4 のピッチ角

(e). IG5 のピッチ角

図 5-9. 風力タービン IG1~IG5 のピッチ角

図 5-10. ウインドファームの出力電力

図 5-11. 系統の周波数

5-5 まとめ

本章では、周波数変動を抑制するため、第 4 章で提案したピッチ制御系における系統出力電力目標値の決定方法を更に検討し、系統周波数偏差に対応して出力電力目標値を増加、減少する新ピッチ制御系を提案した。また、容量が 1000[MVA]である大規模電力系統モデルを用いて、提案したピッチ制御系の有効性を確認するため、電力解析ソフト PSCAD / EMTDC によりシミュレーション解析を実行した。その結果、提案したピッチ制御系は大容量系統に対しても適用でき、系統の周波数変動をかなり抑えることができることが確認できた。しかし、周波数変動を抑えることにより、系統の出力電力も減少するので、この点の改善が今後の課題である。

第 6 章　永久磁石式風力発電機(PMSG)による負荷周波数変動抑制制御に関する検討

近年、かご型誘導発電機(IG)と永久磁石式同期発電機(PMSG)の二つのタイプの風力発電機の導入が増加している。風力タービンは、固定速度または可変速度で動作させることができる。固定速風車で運転されるかご型誘導発電機(IG)は構造が簡単な為に非常に丈夫、価格が安いなどの利点を有するが、電力品質制御の点で可変速機に比べて劣っている[6]。永久磁石式同期発電機(PMSG)は可変速風力発電機として、固定速機よりも優れた性能を有している。PMSG がフルコンバータを用いて電力系統に接続されているため、系統側の有効、無効電力を独立に制御することができ、系統の周波数制御にも寄与できる。したがって本章では電力系統における PMSG による系統の周波数制御を検討する。

文献[24]では風力発電機による系統周波数制御が提案されている。しかしそこでは、IG と PMSG がウインドファームに混在しているケースは考慮されていない。また、負荷周波数変動を抑制するために、IG に基づく風力発電機のピッチ角制御において SMA(単純移動平均)、EMA(指数移動平均)とローパスフィルタに基づく制御方法も提案されている[5]。この提案手法では、風力発電機の出力目標値が風速データに基づいて決定され、結果的に風力発電機の出力変動を平滑化することができている。しかしながら、ウィンドファームの総発電電力量が大幅に減少している。そこで本章では、IG は従来の制御方法で最大出力で運転し、一方 PMSG により系統の周波数変動を制御する方法を検討する。このようにウインドファームに PMSG と IG を組み合わせて設置することにより、設置・維持管理費用を低減させ、負荷周波数変動を抑制できることが期待できる。

6-1 シミュレーションモデル

6-1-1 モデル系統

本章で用いた電力系統モデルを図 6-1 に示す。系統モデルは、ウィンドファーム(WF)、同期発電機 4 機、及び負荷から構成されている。負荷の力率(PF)は 0.8 で、容量が 1000 MVA である。同期発電機は水力発電所 1 機(SG1)、 火力発電所 2 機(SG2 及び SG3)と、原子力発電所 1 機(SG4)から構成されている。 SG1 と SG2 は負荷周波数制御(LFC)で運転され、SG3 はガバナフリー制御で、SG4 はロードリミット(L.L)で運転されている。LFC は長周期の周波数変動を制御するために使用され、ガバナフリー制御は短い周期の変動を制御するために使用される。ロードリミットは、出力電力を一定に保つために使用される。

ウインドファームは、固定速機の誘導発電機 3 機(IG1～IG3)、可変速機の永久磁石式

同期発電機 2 機(PMSG1 と PMSG2)で構成されている。Q_cとX_cは並列コンデンである。Q_cは送電線などのインピーダンスによる電圧降下を補償するために、負荷の端子に設置されている。X_cは、誘導発電機による無効電力の消費を補償するために誘導発電機の端子に設置されている。X_cの値は、風力発電機の力率が定格運転時に 1 になるように設定した。モデル系統の容量は 1000 MVA であり、定格周波数が 50 [Hz]である。誘導機モデルとして普通かご形、同期機モデルとして SG1 は突極形、SG2,SG3,SG4 は円筒形を用いた。ただし、誘導機、同期機の磁気飽和は考慮していない。同期発電機、風力発電機のパラメータをそれぞれ表 6-1 及び表 6-2 に示す。

図 6-1.　モデル系統

表 6-1.　同期発電機の定数

Synchronous Generators				
Gen. Name	SG1	SG2	SG3	SG4
MVA	200	200	300	300
Xd	1.2 pu	2.11 pu		
Xq	0.7 pu	2.02 pu		
H	2.5 sec	2.0 sec		

表 6-2.　風力発電機の定数

Wind Generators			
IG (each)		PMSG (each)	
MVA	20	MVA	20
R1	0.01 pu	Rs	0.01 pu
X1	0.1 pu	Ls	0.06 pu
Xm	3.5 pu	Xd	0.9 pu
R21	0.035 pu	Xq	0.7 pu
R22	0.014 pu	Flux	1.4 pu
X21	0.03 pu	H	4.0 sec
X22	0.089 pu		
H	1.5 sec		

6-1-2 風車モデル[19][20]

本論文では風車モデルとして MOD-2 風車を用いた[19]。MOD-2 風車のモデル式は以下の式(6-1)～(6-4)のように表現できる。

$$P_w = 0.5\rho\pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda,\beta) \quad \cdots\cdots (6.1)$$

$$C_p(\lambda,\beta) = c_1\left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\right)e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \quad \cdots\cdots (6.2)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \cdots\cdots(6.3)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_w} \quad \cdots\cdots(6.4)$$

ここで、

P_w: 風車出力[W], λ: 周速比, R: 風車半径[m], ρ: 空気密度[Kg/m^3],
V_w: 風速[m/s], C_p: パワー係数,

C_pは周速比 λ と風車のピッチ角度 β に対応する。風車のパワー係数C_pが式(6-3)によって算出できる[9]。C_1~C_6は、風力タービンの特性係数であり(C_1 =0.5176、C_2 =116、C_3 =0.4、C_4=5、C_5=21 とC_6=0.0068)、ω_rは風車の回転速度[rad/sec]である[10]。風車特性を図 6-2 に示す。β=0、λ=8.2 の時にC_pは最大値(C_{p-opt}=0.48)になる。λ のこの値を最適値(λopt)と定義する。

図 6-2. 風車特性

可変速風力タービンでは、最大電力点追従(P_{mppt})は式(6-5)により計算される[11]。異なる風速に対する風力タービンの電力出力特性を図 6-3 に示す。回転速度が 1[pu]、風速が 11.5[m/sec]の時、最大出力電力値が得られる。

$$P_{mppt} = 0.5\rho\pi R^2 \left(\frac{\omega_r R}{\lambda_{opt}}\right)^3 C_{p-opt} \quad \cdots\cdots(6.5)$$

図 6-3.　風力タービンの出力特性

6-1-3 ピッチ制御系[5][22][24]

図 6-4 及び図 6-5 はそれぞれ、固定速風車と可変速風車のピッチ角制御系のモデルを示す。固定速風車では、IG の出力電力が定格電力を超えないように従来のピッチ制御を使用する。可変速風車では、定格速度を超えないように PMSG の回転速度を調整する目的で、ピッチ角制御を使用する。

図 6-4.　固定速風車のピッチ制御系

図 6-5.　可変速風車のピッチ制御系

6-1-4　自動電圧調整装置(AVR) モデル[5][21][22]

自動電圧調整装置 AVR のモデルを図 6-6 に示す。本論文では、このモデルを本章でのすべての同期発電機に使用している。同期発電機の電圧は、界磁電流によって変化する。このため、定常運転時に電圧を一定に保持するためにこの装置が必要となる。

図 6-6.　自動電圧調整装置モデル

6-1-5　調速機モデル[5][20][22]

同期発電機のガバナーモデルは電気学会の標準モデルを使用される。これを図 6-7、図 6-8 に示す。SG1, SG2 のモデルは(一定運転 ＋LFC)、SG3 のモデルはガバナフリー運転、SG4 のモデルはロードリミット(L.L)運転となるよう設定した。ただし、LFC 発電機である SG1,SG2 の Sg (回転数偏差［pu］)は(一定運転 ＋LFC)にするため 0 とした。

図 6-7.　水力発電機用調速機

図 6-8.　火力・原子力発電機用調速機

図 6-7，6-8 において、

Sg:回転数偏差［pu］，65M:負荷設定(初期出力値) [pu],

77M:負荷制限(65M + 定格 MW 出力 × PLM[%]),

PLM:ガバナ運転余裕[%] (定格[MW]出力に対する割合)，Pm:タービン出力[pu].

ここで、本解析では G.F 運転の SG3 の PLM を 5[%]とし、L.L 運転の SG4 の PLM を -20 [%]にしている。SG1, SG2, SG3, SG4 の 65M,77M の値を表 6-2 に示す。

表 6-2.　65M,77M の値

SG1(Hydro)			SG2(Thermal)		
Frequency control	65M	77M	Frequency control	65M	77M
LFC	LFC signal	1	LFC	LFC signal	1
SG3(Thermal)			SG4(Nuclear)		
Frequency control	65M	77M	Frequency control	65M	77M
G.F	0.8	0.84	L.L	0.96	0.8

6-2 可変速度風力発電機 PMSG の制御システム[24][25]

6-2-1　PMSG の制御システム

可変速風力発電機 PMSG の制御システムを図 6-9 に示す。本システムは、風力タービン、PMSG、発電機側コンバータ、系統側コンバータ、DC リンク回路、そして本章で提案する一次負荷周波数制御器からなる。風力タービンはギヤレスで PMSG を直接駆動する。二つのコンバータはダイオードクランプを持った 2 レベルの IGBT で構成される。PMSG の固定子は直接発電機側コンバータに接続される。PMSG によって発生した交流電圧は発電機側コンバータにより直流電圧に整流される.

三相電流(I_{sa}, I_{sb}, I_{sc})、有効電力および無効電力が PMSG の固定子端で検出される。発電機回転数ω_rも検出される。整流された直流電圧は電力系統側コンバータによって交流電圧に再び変換される。コンバータの出力は昇圧トランスを通して電力系統に供給される。電力系統側の電流(I_{ga}, I_{gb}, I_{gc})は系統側コンバータ出力端で検出される。一方、三相電圧(V_{ga}, V_{gb}, V_{gc})は変圧器の高圧側端子で検出される。系統側コンバータと電力系統の周波数の同期を取るために PLL が使用される。一次負荷周波数制御器は、負荷周波数の変動を抑制するように有効電力出力を制御する。

図 6-9.　可変速風力発電機 PMSG の制御システム

6-2-2　PMSG の系統側と発電機側のブロックモデル

発電機側のブロックモデルを図 6-10 に示す。発電機側コントローラの目的は PMSG の有効及び無効電力を制御することである。PMSG の三相固定子電流はパーク変換を使うことによって dq 軸座標系変数に変換される。PMSG の回転速度から得られた回転子角の位置θ_eは abc と dq 変数の間の変換に使われる。PMSG の有効電力と無効電力は q 軸電流I_{sq}と d 軸電流I_{sd}によってそれぞれ制御される。その有効電力目標値は式(6.5)で表現された MPPT 法によって決定される。無効電力目標値は力率 1 のためゼロにセットされる。

図 6-10.　PMSG の発電機側のブロックモデル

図 6-11 に PMSG の系統側制御システムのブロック図を示す。三相系統電流及び電圧は dq 回転座標系に変換される。静止座標系上での系統電圧を dq 回転座標系に変換すると、V_{ga}は一定に、V_{gq}は 0 になる。従って、電力系統に送られる有効及び無効電力は d 軸電流I_{gd}と q 軸電流I_{gq}それぞれによって制御できる。DC リンクコンデンサ電圧V_{dc}は電力系統に PMSG によって発生した有効電力を供給するために一定に維持される。力率 1 運転のために、q 軸電流目標値は 0 にセットされる。そのため電力系統に供給される無効電力は 0 になる。

図 6-11.　PMSG の系統側のブロックモデル

6-2-3　PMSG による負荷周波数制御システム

本章で提案する PMSG の負荷周波数制御システムを図 6-12 に示す。負荷周波数偏差、すなわち電力システムの周波数(f_{load})と定格周波数(f_{set} =50 Hz)の間の差を測定フィルタ、ウォッシュアウトフィルターとドループ制御(ドループR_pの値は、シミュレーション試行によって 0.03 に決定した。)を通し、その周波数偏差に対応する発電機の回転速度偏差($\Delta\omega_r$)が算出される。これを風車の回転速度(ω_r)に加算し、発電機の回転速度目標値($\omega_r{}^*$)を算出する。その回転速度目標値($\omega_r{}^*$)を MPPT 制御に適用して発電機の出力目標値($P_s{}^*$)が決定される。発電機の回転速度(ω_r)が系統周波数の偏差に影響され、増加/減少する(f_{load} > f_{set} の時$\Delta\omega_r$が負になり、ω_rが減少、$P_s{}^*$も減少し、結果として系統の周波数が減少する)。このように、発電機の出力を系統周波数の変動に対応して制御することにより負荷周波数の変動を抑制する。

発電機の出力目標値($P_s{}^*$)の計算方法を式(6.6)に示す。

$$P_s^* = 0.5\rho\pi R^2 \left(\frac{\omega_r * R}{\lambda_{opt}} \right)^3 C_{p-opt} \qquad \cdots\cdots(6.6)$$

図 6-12.　PMSG の負荷周波数制御システム

6-3　シミュレーション条件

本章で提案した制御法の有効性を確認するため PSCAD / EMTDC を用いて、シミュレーション解析を行う。同期発電機と誘導発電機（一定風速で運転）の運転が計算上安定した状態に移行した後に図 6-13 のような北海道で測定された実風速データを入力する。シミュレーション時間は 600[sec]とし、シミュレーションパターンとして二つのケースを実行した。Case1 が IG と PMSG がすべて従来法により制御される場合であり、Case2 が提案した PMSG の負荷周波数制御方式である。

図 6-13.　風速

6-4 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 6-14~図 6-19 に示す。図 6-14 には、誘導発電機(IG)の有効出力を示す。従来法と提案法における IG の制御システムが同じなので、従来法と提案法の結果も同じである。図 6-15 に、従来法と提案法の PMSG の有効出力を示す。これにより、提案法の PMSG の有効出力が従来法よりも低下している部分が見受けられる。従来法と提案法におけるウインドファーム総有効出力を図 6-16 に示す。これより、従来法に比べて提案法の場合、ウインドファーム出力が平滑化されていることが確認できる。従来法と提案法におけるウインドファームの発電電力量を図 6-17 に示す。提案法における発電電力量の低下は僅かである。同期発電機の有効出力を図 6-18 の(a),(b)に示す。図 6-19 は、系統の周波数変動である。これより、提案法において周波数変動がかなり減少していることがわかる。

図 6-14.　IG の有効出力

図 6-15.　PMSG の有効出力

図 6-16.　ウィンドファームの有効出力電力

図 6-17.　ウィンドファームの発電電力量

(a).　SG1-SG2 の有効出力電力

(b). SG3-SG4 の有効出力電力

図 6-18. 同期発電機の有効出力電力

図 6-19. 電力系統の周波数変動

6-5 まとめ

本章では、系統の負荷周波数変動を抑制するための系統連系ウインドファームにおける PMSG 風力発電機の新しい制御手法を提案した。提案方法の妥当性を明らかにするために、実際の風速データを用いてシミュレーション解析を実行した。シミュレーション結果から、提案した新しい制御方法により、ウインドファームの出力低下を小さく抑えつつ、系統の周波数変動を効果的に抑制できることが確認できた。

今後の課題として、負荷変動を考慮した場合における本制御法を用いた場合の周波数変動抑制効果を検討する必要がある。

あとがき

本論文では、風力発電機の出力平滑化のための新しいピッチ制御法を提案し、電力系統解析ソフト PSCAD/EMTDC を用いたシミュレーション解析によりその有効性に関して検討した。

第 1 章では、風力発電システムの概要について述べた。第 2 章では、複数の風力発電機からなるウインドファームと水力、火力、原子力発電機から成る系統モデルを構築し、負荷周波数制御(LFC)やガバナフリー運転、ロードリミット運転などの発電機の動作を考慮して、風力発電の出力変動が系統周波数にどの程度影響を与えるかを調査した。また、系統周波数変動は、一般に系統側の出力の調整能力が低下する深夜などの軽負荷時に顕著に現れるため、第 3 章では SMA(単純移動平均)と EMA(指数移動平均)を用いたピッチ制御系を構築し、第 2 章と同じ系統モデルを使って、ウインドファームの出力に対する系統周波数の変動特性を検討した。EMA ピッチ制御系は従来のピッチ制御系よりも周波数変動を抑える効果が高いが、重負荷の厳しい条件の場合に EMA ピッチ制御系でも周波数変動を 0.2[Hz]以内に抑えることが難しくなるとの結果が得られた。そこで、第 4 章では第 3 章と同じモデル系統を用いて、更に周波数変動を抑制するための新しい LPF ピッチ制御系を提案し、検討した。その結果、新 LPF ピッチ制御系は EMA ピッチ制御系よりも周波数変動が小さくなる結果が得られた。第 5 章では新しい大規模モデル系統を用いて、第 4 章で提案したピッチ制御系を基礎として、更に系統への出力目標値の決定に周波数偏差も考慮する新しいピッチ制御系を構築し、検討を加えた。その結果、この新ピッチ制御系により系統の周波数変動をかなり抑えることができることが確認された。最後に第 6 章では、近年かご型誘導発電機(IG)と永久磁石式同期発電機(PMSG)の二つのタイプの風力発電機の導入が増加している現状を踏まえ、IG と PMSG の二つのタイプの風力発電機を含む系統モデルを構築し、PMSG の出力を系統周波数の変動に対応して制御する新しい負荷周波数変動抑制法を提案した。シミュレーション解析の結果、提案した新しい制御法により、ウィンドファームの出力低下を小さく抑えつつ、系統の周波数変動を効果的に抑制できることが確認できた。

以上により、固定速風力発電機 IG、可変速風力発電機 PMSG ともにピッチ制御や出力制御によって系統の周波数変動抑制を達成できる新しい制御システムを構築できた。これらの提案システムでは、蓄電池を使用しないで風力発電機のみで制御を行う点に最大の特徴があり、今後の風力発電の更なる進展に寄与できるものと考えられる。

今後の課題としては、系統容量に比べて更にウィンドファーム容量が大きい場合の検討や、系統負荷変動を考慮した場合の検討が必要であると考えられる。

謝　辞

本研究を進めるにあたり、田村淳二教授には、五年間にわたり、大変多くのご助言、ご指導を賜り心より感謝を申し上げます。なにより、研究の成果を多くの学会で発表する経験ができたことは、私にとって大きな財産であり社会人になっても活かさなければいけないことだと考えております。そして、様々なご助言や励ましのお言葉を頂いた高橋理音准教授、実験や学会発表の引率の際にお世話になった梅村敦史助教、実験の際に様々な助言や指導をしていただいた小竹正敏技官、研究に対し様々な助言を頂いた S.M.Muyeen さんに対し心より感謝申し上げます。

特別研究員の Rosyadi Marwan さんにはいろいろと研究に関するアドバイスを頂き、心より感謝致します。また、2010 年大学院博士前期課程修了の荒巻博行さん、市田基さん、大槻勇介さん、宮袋隼さん、福田篤史さん、2011 年大学院博士前期課程修了の黒瀬誉史さん、櫻井大介さん、中谷正親さん、竹内彰浩さん、竹川幸祐さん、金谷土牛さん、2012 年に大学院博士前期課程修了の丸山充人さん、稲葉竜也さんは大変お世話になり深く感謝致します。さらに、大学院 2 年生、1 年生の皆さん、4 年生の皆さんにも、お世話になり心より感謝致します。

論文の審査員になっていただきました小原伸哉教授、谷本洋教授、川村武准教授には多くのご助言をいただき、最終的な論文の形に仕上げることができました。ここに深く感謝いたします。

また、北見工業大学の元国際交流センタ長の山岸橋教授、現国際交流センタ長のナタリ先生には、日本での留学期間大変お世話になり心より感謝致します。国際交流センタの小野様、白鳥様、鈴木先生、学生支援課の村井様にもいろいろお世話になりました。皆様のおかげで、留学生活がものすごく楽しく、日本での勉強を順調に進めることができました。ここに心より感謝致します。

2010 年の３月から幸い米山奨学生に採用され、北見西ロータリークラブの皆様には生活面で多大なご支援をしていただき、無事に博士学位を取得できました。心より感謝致します。今後、将来の日中友好の架け橋となれるよう貢献していきたいです。

最後に、北見工業大学に在学中の五年間、電気電子工学科の教授の皆様、北見工業大学の教職員の皆様、今まで関わってきた全ての皆様方に感謝の意を述べると共に、電気機械研究室の発展をお祈り致しまして、謝辞に代えさせて頂きます。

刘　俊俏（リュウ・ジュンチャオ）

平成 26 年 3 月

参考文献

[1] 独立行政法人　新エネルギー産業技術総合開発機構　[NEDO], http://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/guidebook.html

[2] The Global Wind Energy Council (GWEC), Global wind report 2012, April (2013). [Online].Available on, http://www.gwec.net

[3] Jauch C, Matevosyan J, Ackermann T, and Bolik S., : International comparison of requirements for connection of wind turbines to power systems, Wind Energy, Vol. 8. No. 3, pp. 295–306, 2005.

[4] R. Cardenaes, R. Pena, G. Asher, and J. Clare: Power smoothing in wind generation system using a sensorless vector controlled induction machine driving a flywheel, IEEE Transaction on Energy Conversation, Vol 19. Issue. 1. pp. 206-216, 2004.

[5] T. Yamazaki et al.: Smoothing Control of Wind Generator Output Fluctuations by New Pitch Controller, IEEJ Trans. PE, Vol. 129, No. 7, pp .880-888, 2009.

[6] Thomas Ackermann: Wind power in power system, John Wiley & Sons, UK, 2012.

[7] 四国電力株式会社, http://www.yonden.co.jp

[8] 文部科学省 気象庁 環境省:気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」（2012 年度版）, 2013 年 3 月.

[9] 株式会社ＴＫＸ, http://www.tkx.co.jp

[10] NEDO :「風力発電導入ガイドブック第 9 版」.

[11] 財団法人エネルギー総合工学研究所, http://www.iae.or.jp/

[12] 財団法人 日本原子力文化振興財団 [JAERO], http://www.jaero.or.jp/

[13] 資源エネルギー庁, http://www.enecho.meti.go.jp/

[14] 牛山 泉：風力エネルギーの基礎, オーム社.

[15] 化学工学会 ：「図解　新エネルギーのすべて」, 工業調査会.

[16] 松宮　煇、青木　繁光、飯田　誠：「図解　風力発電のすべて」, 工業調査会.

[17] 三菱重工業株式会社: 風車の基礎知識インデックス, http://www.mhi.co.jp/products/expand/wind_kiso.html

[18] 清水　幸丸: 「風力発電技術（改訂版）」, パワー社.

[19] Siegfried Heier : Grid integration of wind energy conversion systems, John Wiley & Sons Ltd, 1998.

[20] S. M. Muyeen, J. Tamura, and T. Murata : Stability augmentation of a grid connected wind farm, Green Energy and Technology, London, Springer-Verlag, 2009.

[21] H.Umeki, R. Takahashi, T.Murata, J.Tamura, Y.Tomaki, A.Sakahara, E.Sasano : Smoothing Control of Wind Generator Output Fluctuations by New Pitch Controller, The 2006 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2006), LS3C-1(6 pages), 2006.

[22] IEE of Japan, Technical Reports Vol.754: Standard Models of Electrical Power System, pp. 40-43.

[23] N.Kurose, R.Takahashi, J.Tamura, T.Fukushima, E.Sasano, K.Shinya : A Consideration on the Determination of Power Rating of Energy Storage System for Smoothing Wind Generator Output, International Conference on Electrical Machines and Systems 2010, PS-SRE-28(6 pages), 2010.

[24] Xue Yingcheng and Tai Nengling, “Review of contribution to frequency control through variable speed wind turbine”, Renewable Energy, Vol. 36, pp. 1671-1677, 2011.

[25] Marwan Rosyadi, S. M. Muyeen, Rion Takahashi, Junji Tamura : Voltage Stability Control of Wind Farm using PMSG based Variable Speed Wind Turbine, Proc. of the 2012 XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM2012), pp.2190-2195, 2012.

発表文献

[1] Liu Junqiao, 高橋 理音, 田村 淳二, 福島 知之, 笹野 栄一, 坂原 淳史, 新谷 宏治 : 風力発電による周波数変動特性に関する検討, 電気学会回転機研究会資料 RM-10-134, 2010/10.

[2] Liu Junqiao, 高橋 理音, 田村 淳二, 福島 知之, 笹野 栄一, 坂原 淳史, 新谷 宏治 : 風力発電による周波数変動特性に関する検討, 平成 22 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.32, 2010/10.

[3] Liu Junqiao, Rion Takahashi, Junji Tamura, Tomoyuki Fukushima, Atsushi Sakahara, Koji Shinya : A New Control Strategy for Smoothing Frequency Fluctuation due to Wind Generation, 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2011), #PS-RE-08(6 pages), 2011/08.

[4] リュウ ジュンチャオ, マルワン ロシャディ, 高橋 理音, 田村 淳二, 福島 知之, 坂原 淳史, 新谷 宏治, 吉岡 一誠 : 新ピッチ制御による風力発電機を含む電力系統の周波数変動抑制, 平成 23 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.38, 2011/10

[5] Junqiao Liu, Marwan Rosyadi, Rion Takahashi, Junji Tamura, Tomoyuki Fukushima, Atsushi Sakahara, Koji Shinya, and Kazuki Yoshioka : Mitigation of Load Frequency Fluctuation Using a Centralized Pitch Angle Control of Wind Turbines, 2012 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), #DS2G5-1(6 pages), 2012/10.

[6] Liu Junqiao, Marwan Rosyadi, Rion Takahashi, Junji Tamura, Tomoyuki Fukushima, Atsushi Sakahara, Koji Shinya, Kazuki Yosioka : A New Pitch Control System of Wind Turbine to Damp Power System Frequency Fluctuations, Proc. International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) 2012, (5 pages), 2012/11.

[7] Liu Junqiao, Marwan Rosyadi, Rion Takahashi, Junji Tamura, Tomoyuki Fukushima, Atsushi Sakahara, Koji Shinya, Kazuki Yosioka : Mitigation of Load Frequency Fluctuation using a Centralized Pitch Angle Control of Wind Turbines, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol.2, No.1, pp.104-110, 2013/03.

[8] Liu Junqiao, Marwan Rosyadi, 梅村 敦史, 高橋 理音, 田村 淳二 : 負荷周波数変動を抑制するための電力系統連系ウィンドファームにおける PMSG 風力発電機の制

御手法, 電気学会回転機研究会資料 RM-13-147, 2013/11.

[9] Junqiao Liu, Marwan Rosyadi, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : A Control Method of Permanent Magnet Wind Generators in Grid Connected Wind Farm to Damp Load Frequency Oscillation, 電気学会論文誌Ｂ(Power and Energy), Vol.134, No.5,2014 年 5 月号掲載予定.