

スイッチトリラクタンス発電機とキャパシタレス AC-AC 変換器に  
よる可変速風力発電システムの理論検証

2020 年 11 月  
工学研究科 物質生産システム工学専攻  
吉 古元

近年、地球温暖化や大気汚染への対策が喫緊の課題となり、再生可能エネルギーの一つである風力エネルギーの利用が注目され、可変速風力発電システム（VSWPGS）の研究開発が盛んに行われている。

一般に VSWPGS には発電機として、誘導発電機（IG）や永久磁石同期発電機（PMSG）が適用されている。IG は、安価かつ堅牢という優れた特徴を有するが、PMSG と比較して低効率であり、VSWPGS への適用においては回転域のマッチングのため増速機を用いる必要があるためギヤ騒音が生じ、IG 始動のために大きな突入電流が生じるという欠点を有する。また PMSG は、高効率かつ低騒音であるという優れた特徴を有するが、永久磁石材料としてレアアースを大量に使用するため、結果的に発電コストが高くなるという欠点を有する。一方、スイッチトリラクタンス発電機（SRG）は、主要部分がコアとコイルのみで構成されるため、安価かつ堅牢という優れた構造的な特徴を有しており、IG のように二次電流を必要としないので高効率化が期待できる。また、可変速運転に有利となる低慣性の回転子を設計できる可能性があり、刻々と変化する日本の風況への適応力が期待できる。

SRG を用いる VSWPGS では、系統連系するために、非対称ハーフブリッジインバータと PWM インバータの組み合わせる電力変換装置を用いることが一般的であり、そのため直流リンク部に大容量のキャパシタを有している。従って、カットイン時にキャパシタの充電が必要のため稼働率が下がり、またキャパシタの定期メンテナンスを必要とするため、発電コストが増加する。このような問題に対する改善策として、キャパシタを用いないキャパシタレス AC-AC 変換器の開発が望まれている。

そこで、本論文では SRG による VSWPGS への適用を前提として、キャパシタレス AC-AC 変換器を提案する。また、キャパシタレス AC-AC 変換器による SRG の励磁方法を提案するとともに、風速変化に対して適切に回転数を制御できる VSWPGS の速度制御器を提案する。更に SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器を用いる VSWPGS の理論検証を実施するために、構成要素の数学モデルを構築し、Matlab/Simulink において、風速を変化させた場合のシミュレーションを行う。

以下に本論文の構成ならびに概要を記す。

第 1 章では、本研究の背景として風力発電に関する基礎について述べる。

第 2 章では、使用する SRG の基本原理および制御方法を説明する。

第 3 章では、提案するキャパシタレス AC-AC 変換器の構造、原理と励磁方法を説明する。

第 4 章では、SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器を用いる VSWPGS のシミュレーション方法について述べる。更に風速変化に対するシミュレーションを実施し、シミュレーション結果を考察することにより、提案方式の理論検証を行う。

第 5 章では、本研究で得られた研究成果をまとめ、また今後の研究課題について記す。

In recent years, the countermeasures to deal with global warming and air pollution have become an urgent issue, much attention has been given to use of wind energy which is one of the renewable energy sources, and the research and development of a variable speed wind power generation system (VSWPGS) has been actively worked out.

In general, an induction generator (IG) and a permanent magnet synchronous generator (PMSG) are applied to a VSWPGS as generators. The IG has the excellent features of being inexpensive and robust, but it is less efficient than a PMSG. It has the disadvantage that gear noise is generated because it is necessary to use a speed increaser to match the rotation range when applied to a VSWPGS, and a large inrush current is generated to start the IG. Conversely, the PMSG has the excellent features of high efficiency and low noise, but its main disadvantage is that the power generation cost increases because a large amount of rare earth is used as a permanent magnet material. Comparatively speaking, the switched reluctance generator (SRG) has excellent structural features of low cost and robustness because the main part is composed only of the core and coil since it does not require a secondary current as a IG, so high efficiency can be expected. Furthermore, it is possible to design a rotor with low inertia which is beneficial for variable speed operation and can be expected to adapt to the changing wind conditions of Japan. In the VSWPGS using a SRG, it is common to use a power converter that combines an asymmetrical half-bridge inverter and a PWM inverter for the grid connection, so it has a large-capacity capacitor in the DC link part. Therefore, the operating rate decreases because the capacitor needs to be charged at the time of cut-in, and the power generation cost increases because the capacitor needs to be regularly maintained. As a remedy for these problems, the development of a capacitorless AC-AC converter without a capacitor is desired.

This paper proposes a capacitor-less AC-AC converter on the premise that a SRG is applied to a VSWPGS. Also, we propose an excitation method for the SRG using a capacitorless AC-AC converter, and a speed controller of the VSWPGS that can control the appropriate number of revolutions in response to changes in wind speed. Furthermore, in order to work out the theoretical verification of VSWPGS using a SRG and a capacitorless AC-AC converter, a mathematical model of the components is constructed, and a simulation is performed in Matlab / Simulink when the wind speed is changed.

The structure and outline of this paper are described below.

In the first chapter, the basic of wind power generation will be described as a background of this research.

In the second chapter, the basic principle and control method of the used SRG will be explained.

In the third chapter, the structure, principle, and excitation method of the proposed capacitorless AC-AC converter will be explained.

In the fourth chapter, the simulation method of the VSWPGS using a SRG and capacitorless AC-AC converter is described. In addition, we will work out a simulation for changes of wind speed and verify the theory of the proposed method by considering the simulation results.

In the fifth chapter, the results of this research are summarized, and the future works are described.

# 目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	地球環境問題	1
1.1.2	化石燃料の枯渇	3
1.2	風力発電	3
1.2.1	世界の風力	5
1.2.2	日本の風力発電	8
1.3	風力発電システム	10
1.3.1	風力発電用発電機	10
1.3.2	電力変換器	14
1.4	本論文の目的と構成	16
第2章	スイッチトリラクタンス発電機	18
2.1	スイッチトリラクタンス発電機の構造	18
2.2	スイッチトリラクタンス発電機の原理	18
2.3	スイッチトリラクタンス発電機の基礎理論	22
2.3.1	SRG の数学モデル	22
2.3.2	SRG のトルクおよびインダクタンス	25
2.4	スイッチトリラクタンス発電機の発電原理	29
2.5	スイッチトリラクタンス発電機の制御方法	34
2.5.1	角度制御(APC)方式	34
2.5.2	電圧制御(VC)方式	36
2.5.3	電流制御(CCC)方式	36
第3章	キャパシタレス AC-AC 変換器	38
3.1	スイッチトリラクタンス発電機の電力変換器	38
3.1.1	非対称ハーフブリッジインバータ	38
3.1.2	双巻線インバータ	38
3.2	キャパシタレス AC-AC 変換器	40
3.2.1	キャパシタレス AC-AC 変換器の構造	40
3.2.2	キャパシタレス AC-AC 変換器の動作原理	43
3.3	転流方式	45
3.3.1	マトリックスコンバータの転流方式	45
3.3.2	キャパシタレス AC-AC 変換器の転流方式	45
第4章	可変速風力発電システム	50
4.1	SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器による可変速風力発電システム	50
4.2	風車タービン	50
4.2.1	風車タービンの種類	50
4.2.2	風車タービンの理論と特性曲線	52
4.2.3	翼素理論	56
4.2.4	翼素運動理論	57
4.3	可変速風力発電システムのシミュレーション	59

4.3.1 Matlab/Simulink の紹介.....	59
4.3.2 風速.....	60
4.3.3 風車タービンモデル.....	62
4.3.4 機械系.....	62
4.3.5 SRG.....	65
4.3.6 キャパシタレス AC-AC 変換器.....	65
4.3.7 コントロール.....	69
4.3.8 速度制御系.....	72
4.4 シミュレーション結果.....	75
第5章 結論.....	94
5.1 本研究の成果.....	94
5.2 今後の課題.....	94
謝辞.....	95
参考文献.....	96
研究業績.....	101

# 第一章 序論

## 1.1 研究背景

エネルギーは人類の文明生存の先決条件であり、世界経済の発展の原動力でもある。エネルギー技術の不断の進歩に伴って、人類社会は急速に発展してきた。現段階では、全世界のエネルギーは化石燃料を中心としている。世界経済の繁栄と人類のエネルギー消費が日増しに増加するにつれて、化石燃料は資源枯渇の圧力に直面している。また、化石燃料の大量燃焼は自然環境を汚染し、人々の日常生活に影響を与える。環境汚染と資源不足の影響を緩和し、社会の持続的な発展を維持するために、世界各国はクリーンな再生可能エネルギーの応用に注力している。その再生可能エネルギーの中で、風力エネルギーはコストが低い上に、その資源が豊富なので、多くの恩恵を受けることができる。

### 1.1.1 地球環境問題

世界人口は年間 9300 万人の割合で増え続けており、先進国の増加率が 0.5%で、開発途上国の増加率が 2.1%である。国連の世界人口推計によると、世界人口は 1950 年に 25 億人、1987 年には 50 億人となり、1998 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 98 億人に達すると予測されている<sup>(1)</sup>。図 1.1 に 2050 年までの世界人口の推移(推計値)グラフを示す。このような人口の増加に伴い、より多くの人々が快適で豊かな生活を求めるようになるため、エネルギー消費量の増加が加速する。

主たるエネルギー資源は有限であるため、人々の持続的な消費には対応できず、いずれ資源が枯渇する日がやってくる。特に、図 1.2 で示すようにエネルギー消費量における依存率が高い化石燃料、中でも石炭、石油、そして天然ガスが大量消費されている<sup>(2)</sup>。また、化石燃料の大量消費によって、地球温暖化や、大気汚染による酸性雨など深刻な環境問題が引き起こされている。このまま長期間に亘り使用し続ければ生態系が破壊され、自然環境が不安定になっていく。人々の生活と自然環境を考えると、持続可能なエネルギー利用でできる安定的な社会を構築する必要がある。

現在、電気エネルギーを得るために一次エネルギーである化石燃料が使用されているため、化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が排出されている。その化石燃料の消費量の増加に伴って、二酸化炭素の大気中濃度が増加し、地球温暖化が進行している。図 1.3 に化石燃料による CO<sub>2</sub> 排出量と大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の変化を示す<sup>(3)</sup>。また図 1.4 は、世界の年平均気温の基準値(1981~2020 年の平均値)からの偏差を示している<sup>(4)</sup>。CO<sub>2</sub> 排出量

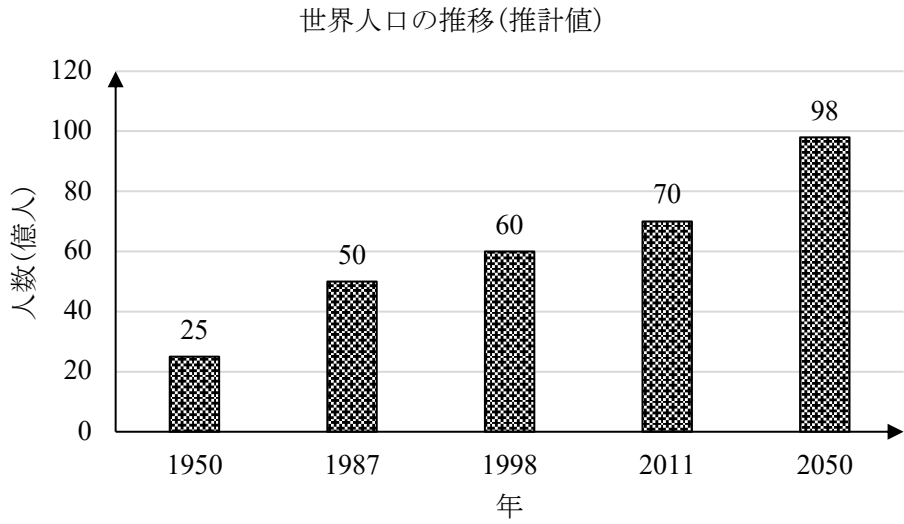


図 1.1 2050 年までの世界人口の推移(推計値)グラフ(出典：世界人口推計 2017 年改定版)  
 Fig.1.1. Transition graph of world population until 2050.

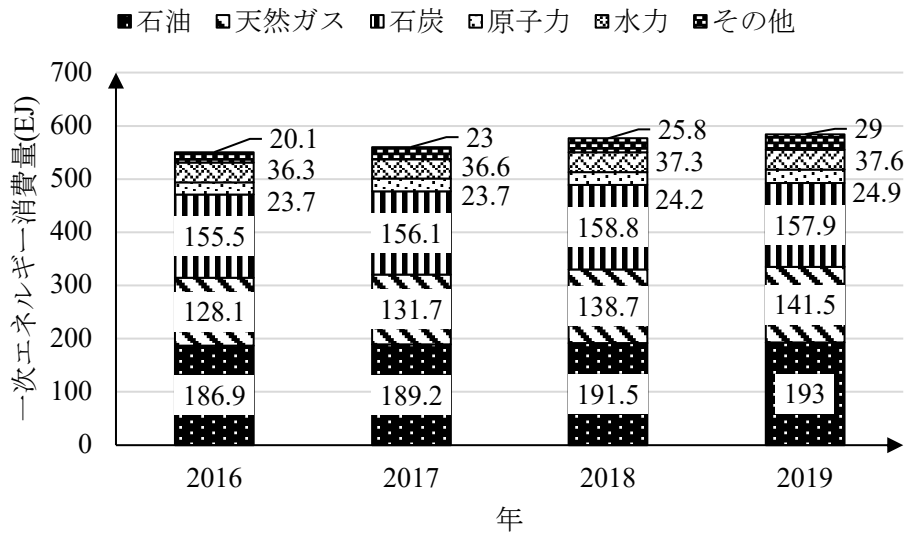


図 1.2 世界の一次エネルギー消費量の推移(出典：BP 統計 2020)  
 Fig.1.2. The transition of global consumption of primary energy.

の増加に伴い、世界の年平均気温偏差が上昇しており、地球温暖化の傾向が顕著に現れている。このような社会状況を鑑み、地球環境問題を解決するために、化石燃料の利用を減らし、再生可能な自然エネルギーの利用を進めることが重要である。

### 1.1.2 化石燃料の枯渇

エネルギー資源の確保と環境保全は人類によって解決しなくてはならない喫緊の課題である。図 1.5 にエネルギー資源の埋蔵量と可採年数を示す<sup>(2)(5)</sup>。現在の主なエネルギー源は、化石燃料である石炭、石油、そして天然ガスである。それらの資源の埋蔵量は限られており、可採年数については、石油が 50 年、天然ガスが 51 年、石炭が 132 年、ウランが 99 年と見積もられている。特に主力である石油については、油田が中東など政情の不安定な地域に偏在していることから、70 年代に陥った二度の世界的なオイルショックのように、石油の供給が滞る可能性がある。また、化石燃料の価格は需要と供給のバランスによって変動しているため、経済的な意味でも供給が不安定である。こういったことから無尽蔵であり環境にやさしい自然エネルギーの利用は、エネルギー資源の確保に有効であり、環境保全にも有効な手段であると結論づけられる。

## 1.2 風力発電

地球環境保全と化石燃料枯渇への対策として、再生可能エネルギーの開発は非常に重要な課題となっている。開発が進んでいる再生可能エネルギー源としては、風力、太陽光、そして水力が挙げられる。

太陽光発電については、太陽電池パネルの価格が下がり、メガソーラー発電所の建設が進んでいるが、十分な日照量が見込める広大な土地が必要となることから建設場所が限られている。水力発電については、ダムや水力発電所の建設に要する期間が長く、更に十分な水量が見込める河川を要することから、太陽光発電よりも開発へのハードルが高い。一方、風力発電については、風力エネルギー自体が豊富であることに加え、陸上よりも風況が良好であるオフショア（洋上）の利用が可能のため、ヨーロッパを中心とする多くの環境先進国でオフショアウインドファーム（洋上風力発電所）の建設が進んでいる。しかしながら、日本は海洋に囲まれているにも拘らず、オフショアウインドファームの導入は遅れており、今後の開発が期待されている。

風力発電とは、風力エネルギーを風力タービンによって運動エネルギー（回転エネルギー）に変換し、その機械エネルギーを発電機によって電気エネルギーに変換する発電方式である。以下において、風力発電の利点と欠点を示す。



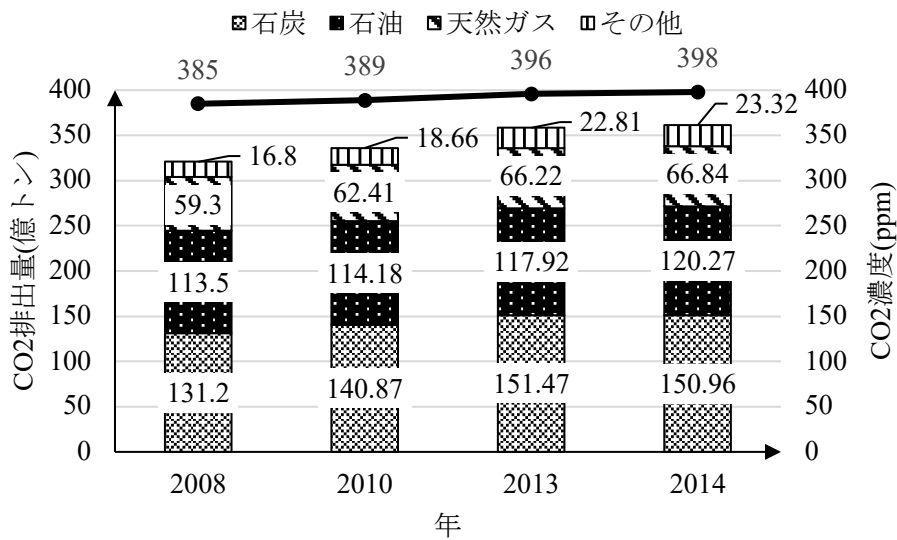


図 1.3 化石燃料による CO<sub>2</sub> 排出量と大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の変化(出典：CDIAC)  
 Fig.1.3. CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel and change of CO<sub>2</sub> density in air.

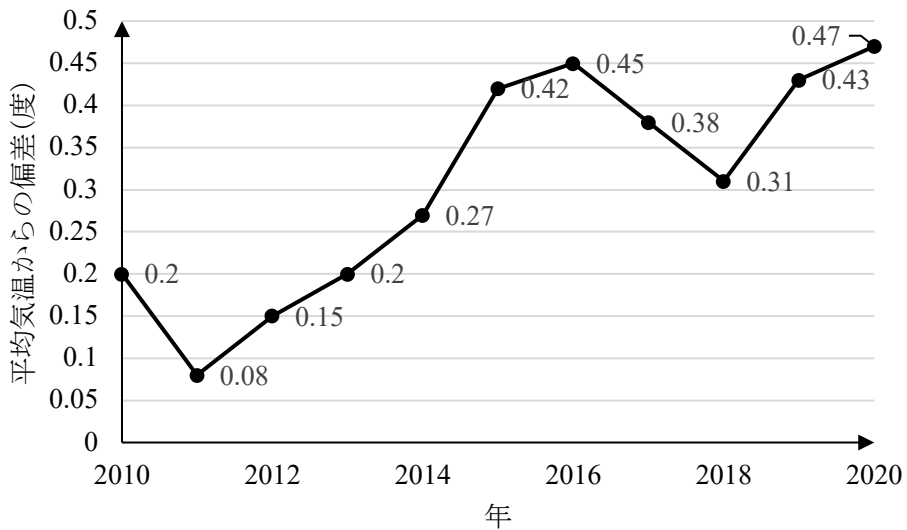


図 1.4 世界の年平均気温偏差(出典：気象庁「世界の年平均気温偏差」)  
 Fig.1.4. Annual average temperature deviation in the world.

利点：

- (1) 地球上には豊富な風力エネルギー資源がある。
- (2) 風力エネルギーは、大気汚染や生態環境破壊の虞のない、クリーンかつ安全な再生可能エネルギーである。
- (3) 風力発電システムの発電コストが低いため、経済的利益の観点から事業化が比較的容易である。
- (4) 再生可能エネルギー発電技術の中では比較的風力発電技術は成熟しており、風力エネルギーは安全性と信頼性が高い。
- (5) 洋上、離島などエネルギー源の確保できる地域では独立電源として活用できる。
- (6) 風力発電設備の建設に要する期間が短く、設備容量の変更に対応しやすい。
- (7) 設置規模の選択が柔軟であり、個人でも活用できる。
- (8) 燃料の必要がないため、物価変動のリスクが小さい。
- (9) 発電設備の修理や点検が比較的容易である。

欠点：

- (1) 風速の変化に応じて出力が変化するため、電力系統の電圧や周波数に悪影響を及ぼす。
- (2) 電力需要の少ない夜間でも発電するため、発電量の調整が必要となる。
- (3) 周囲に騒音や低周波音を発生する。
- (4) 強風や落雷が原因の故障により設備利用率が低い。
- (5) ウィンドファームなど、広大な敷地を占有する。
- (6) 絶滅の恐れのある鳥類に悪影響（バードストライク）を与える。

### 1.2.1 世界の風力発電

風力エネルギーは、世界で最も急速に成長している再生可能エネルギーである。2015年、図 1.6 で示すように、風力発電は世界の再生可能エネルギーによる発電量の 49% を占めている<sup>(6)</sup>。また、図 1.7 で示すように、2015年の風力発電総設置容量は 432,680MW であり、毎年平均 12%の成長率で増加してきた。2017年の風力発電総設置容量は、前年の 487,279MW から 539,123MW に増加し、2016年比で 10.6%の増加となった。2022 まで約 10%の成長率で増加するという予測も立てられている<sup>(7)</sup>。つまり風力エネルギーは、未来の重要な再生可能エネルギーとして期待されている。

風力発電の発展の歴史を振り返ると、1887年にイギリス・グラスゴウの J.ブライスが垂直軸風車により出力 3kW の発電を開始したことが起源とされている。また、デンマークの P.ラクールにより現在の風力発電機の基礎となる風力発電装置が製作された<sup>(8)</sup>。2017年に

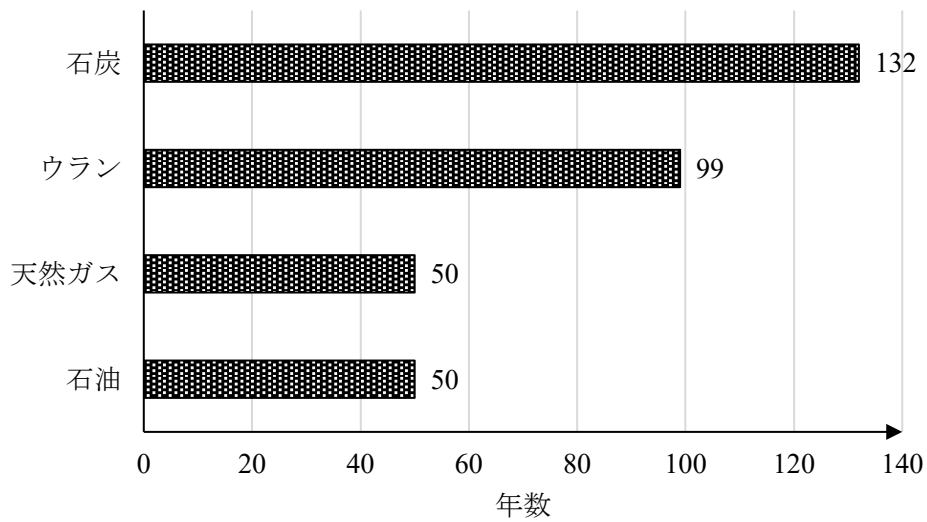


図 1.5 エネルギー資源の埋蔵量と可採年数(出典：世界のエネルギー事情「関西電力」)

Fig.1.5. Energy resource reserves and recoverable years.

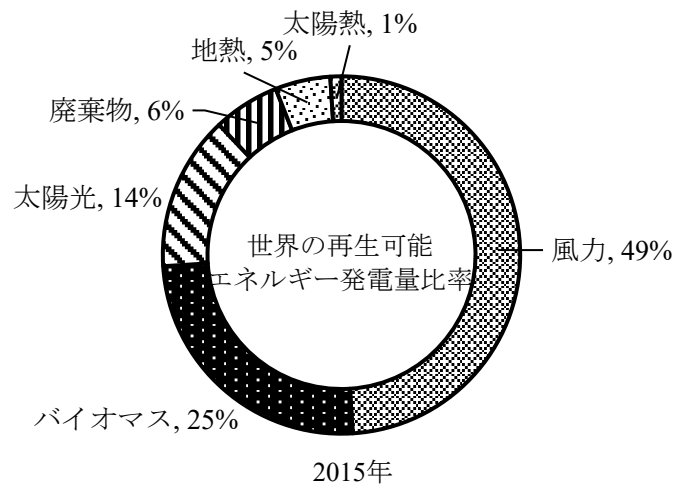


図 1.6 世界の再生可能エネルギー発電量比率(出典：国際エネルギー機関(IEA))

Fig.1.6. Global renewable energy power generation ratio.

における世界の風力発電設備容量としては、中国（18,823 万 kW）、米国（8,908 万 kW）、そしてドイツ（5,613 万 kW）などで導入が進んでいる<sup>(9)</sup>。以下において、主要な風力発電国の発展状況について述べる。

#### (1) ドイツ

ドイツにおける 2010 年の新規風力発電設備容量は、これまでの記録を更新して 1,493MW となり、国全体の総容量は 38,265MW に達した。ドイツ国内で消費されているエネルギーを見てみると、2011 年は 20%が再生可能エネルギーとなっている。その中で風力エネルギーは 8%を占めている。ドイツは総電力消費量に占める風力発電の割合を 2050 年までに 50%に引き上げる新規風力発電開発計画を制定している<sup>(10)</sup>。

#### (2) スペイン

スペインの風力発電は急速に発展し、2010 年の風力発電量は 42,790GWh に達し、スペインの発電量の 16.4%を占めるまでに至っている。2015 年の風力発電設備容量は 23,031MW に達し、世界第 5 位に躍進した<sup>(11)</sup>。

#### (3) インド

近年インドの風力発電容量は大幅に増加している。その発電容量は 2014 年末の再生エネルギーの総発電容量の 65%を占め、風力発電累計導入量は 22.5GW に達している。更に 2017 年には風力発電設備容量は 32.72GW となっている。インド政府は再生可能エネルギーを重視しており、2022 年までに風力発電容量 60GW を導入する目標を設定している<sup>(12)</sup>。

#### (4) 中国

中国の風力エネルギーは豊富であり、世界の風力発電市場の発展をリードしている。風力発電設備容量は 2010 年の 41.8GW から 2015 年には 145.1GW にまで達した。発表された「再生可能エネルギー中長期発展計画」の中で、2020 年までに風力エネルギーを 3,000 万 kW まで開発する目標が掲げられている<sup>(13)</sup>。

最近、風力発電の中で小形風力発電システムが注目されている。2013 年に国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission, IEC）が発表した小形風車本体の国際規格では、小形風力発電システムにおける風車ブレードは、受風面積が 200m<sup>2</sup> 未満のものとしている。また小形風力発電システムにおける発電機は、容量が 100kW 未満であり、直流出力電圧が 1500V 未満、或いは交流出力電圧が 1000V 未満としている<sup>(14)</sup>。大形風力発電システムと比較して、小形風力発電システムは利用できる環境範囲が広く、製造、設置、メンテナンスのコストが低いという特徴を有する。2017 年、世界風力エネルギー協会（World Wind Energy Association, WWEA）が発表した「2017 Small Wind World Report Summary」によると、2015 年末までに小形風力発電システムは 99 万台まで増加しており、設備容量は 948 万 kW に達している。風力発電の発展趨勢から、小形風力発電システムが期待されていることが分かる。

### 1.2.2 日本の風力発電

電気エネルギーは生活に欠かせないものである。日本では、電気エネルギーを得るための発電所は、主に石油、石炭などの化石燃料に依存している。しかし電気エネルギーを安定的に供給するため、化石燃料の自給率が低いと他国の資源に依存しなければならず、エネルギーの危機管理の観点から様々な方策が必要となる。

国際情勢の影響により他国からの化石燃料の供給が滞る可能性がある。また、化石燃料への過度な依存により CO<sub>2</sub> の排出量が増加し、地球温暖化などの環境問題にも配慮する必要があるため、太陽光、水力、風力の自然エネルギーの導入が進められている。日本における風力発電事業は、1949年に当時技術者であった山田基博氏が、札幌で株式会社山田風力発電工業所を設立し、風車の本格的な製造を開始したのが起源である<sup>(15)</sup>。

最近、日本国政府による風力発電事業の推進により風力発電機の設置数が増え、今後導入促進が期待されている。しかしながら世界的に風力発電が成長する中で、日本の2017年に導入された発電容量はわずか18万kW程度で、累積導入量がようやく340万kWを超えた程度であり、風力発電による年間の発電量は全体の1%にも満たないという状況である。経産省が示している2030年のエネルギーミックスでは、風力発電の全発電量に占める割合は1.7%（約1,000万kW）とされているが、日本風力発電協会は3,600万kW以上の導入を目標としている。図1.8に2014年から2019年までの世界の風力発電の導入状況と図1.9に日本国内の単年度および累積の導入実績を示す<sup>(16)(17)</sup>。今後は、日本国内の風力発電の成長が進む中で、風力発電システムの拡充、小形化、発電コスト低減、発電設備利用率の向上が求められる。

風力発電システムは、風力タービン、増速機、発電機、電力変換装置、そして制御系で構成されている。風速の変化に対して風車タービン効率を高く維持するために、風力発電システムは可変速制御性能を有する必要がある。また発電コストを下げするために、風力発電システム本体とそのメンテナンス費用を抑える必要があり、その構成要素の低価格化や高信頼化が望まれている。

表1.1に風力発電システムの構成要素の役割を示す。風力発電システムにおける発電機は、風力エネルギーを電気エネルギーに変換する役割を負っている。小形風力発電システムでは、発電コスト低減が重視されるために、適用される発電機は以下に示す特徴を満足する必要がある。

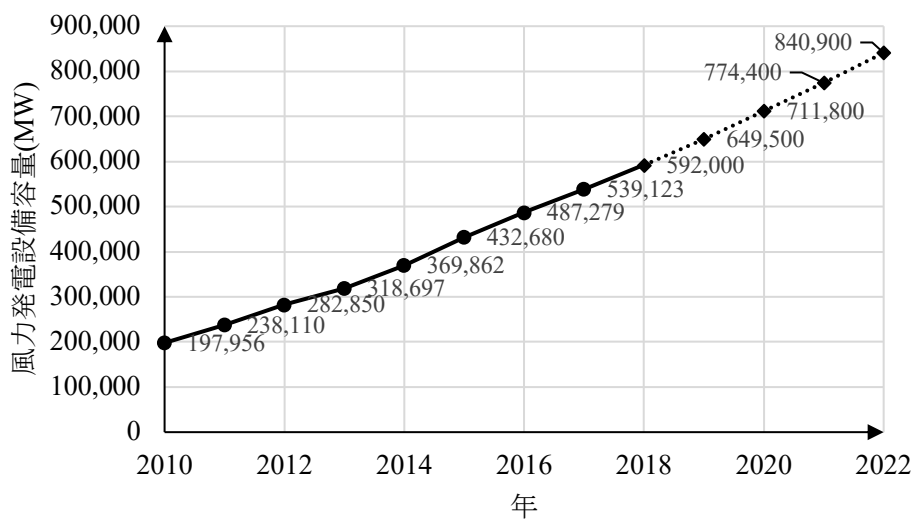


図 1.7 世界の風力発電設備容量(出典：世界風力会議(GWEC))  
 Fig.1.7. Global wind power installed capacity.

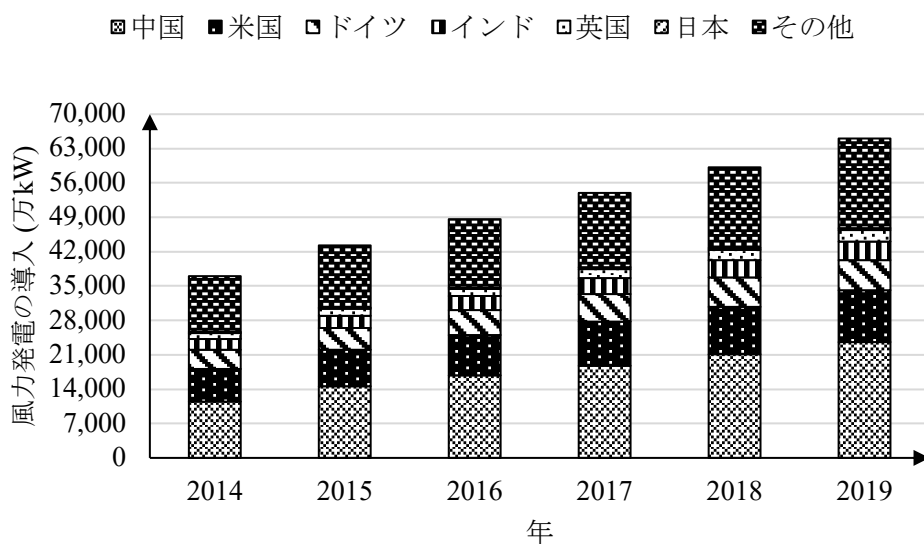


図 1.8 世界の風力発電の導入(出典：Global Wind Report)  
 Fig.1.8. Global Wind power installation results.

- (1) 可変速範囲が広く、広い風速範囲で発電効率を高く維持できる。
- (2) イナーシャが小さく、刻々と変化する自然風への適応力が高い。
- (3) ナセルの重量とサイズを抑えるために、電力密度が高い特徴を有する。
- (4) メンテナンスコストを抑えるために、長寿命かつ耐久性が高い。

## 1.3.風力発電システム

### 1.3.1 風力発電用発電機

風力発電に適用されている発電機は、構造と原理において、図 1.10 に示すように非同期発電機と同期発電機の 2 種類に分けられる。非同期発電機には、かご形誘導発電機 (Squirrel-Cage Induction Generator, 以下 SCIG と略す)<sup>(18)-(20)</sup>, 巻線形誘導発電機 (Wound Rotor Induction Generator, 以下 WRIG と略す)<sup>(21)-(22)</sup>, 二重巻線形誘導発電機 (Doubly Fed Induction Generator, 以下 DFIG と略す)<sup>(23)-(24)</sup>, そしてブラシレス二重巻線形誘導発電機 (Brushless Doubly Fed Induction Generator, 以下 BDFIG と略す)<sup>(25)-(26)</sup>が含まれる。同期発電機には、永久磁石同期発電機 (Permanent Magnet Synchronous Generator, 以下 PMSG と略す)<sup>(27)-(28)</sup>, 電気励磁同期発電機 (Electrically Excited Synchronous Generator, 以下 EESG と略す)<sup>(29)</sup>, そしてスイッチトリラクタンス発電機 (Switched Reluctance Generator, SRG) などが含まれる。

表 1.2 に風力発電機の特徴を示す。SCIG, WRIG, そして DFIG は多段増速機を必要とする。そのため製造とメンテナンスのコストが増加するので、一般に大形風力発電システムで使用されている。EESG は独立した励磁装置が必要となるため、大形風力発電システムでの使用が多い。PMSG は効率が高いため、最近の小形風力発電システムで広く用いられている。しかし、PMSG による小型風力発電システムには、表 1.2 で示す欠点があるため、レアアースを用いない発電機による小型風力発電システムが注目されている。そこで、次世代の省エネ・省資源モータとして、レアアースを用いない SRG への関心が高まり、SRG に関する研究成果の報告が増えてきている。

SRG の歴史を振り返ると、1986 年に英国の科学者 N. N. Fultong によって SRG が提案されたことがこの始まりである<sup>(30)</sup>。そして 1993 年、SRG の制御方法が D. E. Cameron により提案された。提案された制御方法では、ターンオン角度を固定し、ターンオフ角度を調整することで期待する電流波形を得ることができる<sup>(31)</sup>。また D. E. Cameron とは異なる制御方法が、P. C. Kjaer により提案された。その方法は、最適化されたターンオフ角度を固定し、ターンオン角度を調整することにより電流波形を変更し、発電効率を向上させている<sup>(32)</sup>。更に 1995 年に、導通角度を調整することによる電流波形を変更し、効率を向上させる方法が、C. A. Ferreira により提案され、蒸気タービンにより運転される SRG に適用された<sup>(33)</sup>。

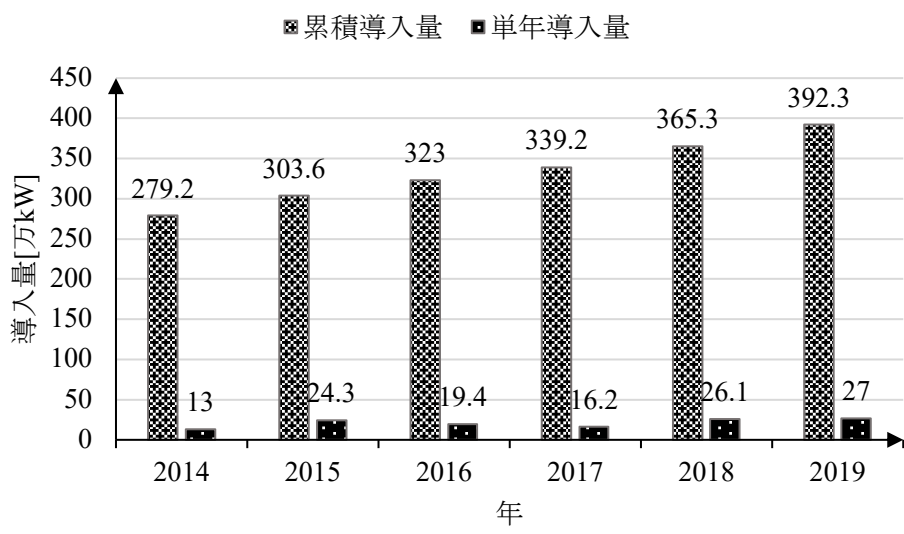


図 1.9 日本の風力発電の導入(出典：Global Wind Report)

Fig.1.9. Wind power installation results of Japan.

表 1.1 風力発電システムの構成

Table 1.1. Structure of wind power generation system.

風車タービン	風力エネルギーを風力タービンのブレードにより回転という動力に変換する
増速機	回転数を発電機に適用な回転数に増速ギア装置
発電機	機械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，交流-直流を変換する装置
制御系	オンオフ信号により電力変換装置を制御する

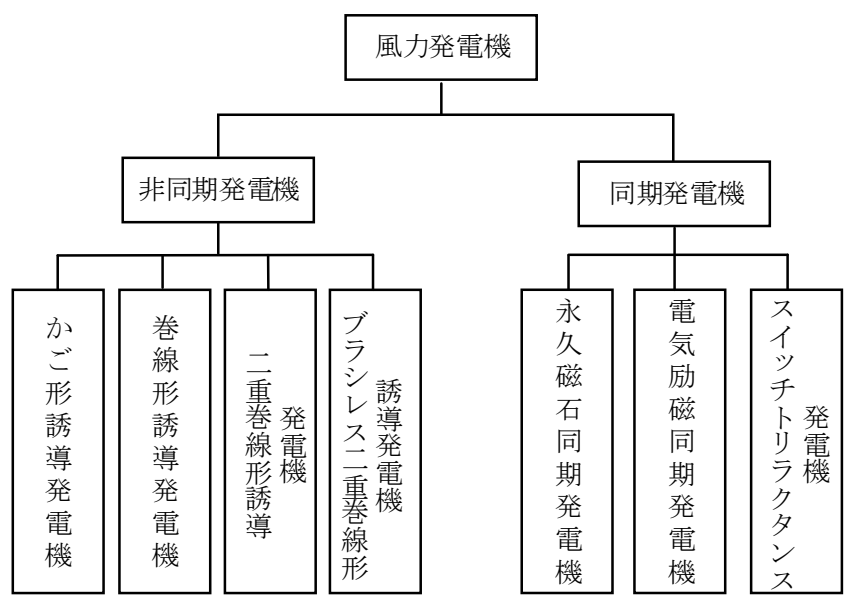


図 1.10 風力発電機の種類

Fig.1.10. Category of wind power generators.



1997年に、SRGのセンサー性能に関する調査が、S. R. Joneshにより報告された<sup>(34)</sup>。1998年に、DC電圧を速度閉ループ制御により調整することにより、システムのエネルギー変換効率を改善する制御方式が、T. Sawataにより提案された。その方式は、SRGのコンバータに降圧コンバータを追加することにより実現される<sup>(35)</sup>。1999年に、開回路および短絡の条件下における分割巻線コンバータを備えた単相SRGに関する研究が、T. Sawataにより実施された<sup>(36)</sup>。2000年に、SRGのDCリンク電流と励磁角のマップを用いる新しい制御方法がE. MeseとY. Sozerにより提案された。その制御方法は、最大効率により必要な電力を供給することができる<sup>(37)</sup>。2002年に、D. A. TorreyはコントローラーによってSRGのエネルギーをどのように変換する方法を検討された<sup>(38)</sup>。2003年に、SRGの全体的な効率を改善するために最適な運動の逆力電力が確保された後にスイッチがオフになる制御方法が、S. DixonとB. Fahimiにより提案された。その提案方法ではフリーホイールリンクを用い、DCリンクから追加のエネルギーを取得せずに励起電流を増加することができる<sup>(39)</sup>。2005年に、SRGの電流制御システムで適切な導通角を選択することによってシステムを最適化する方法が、MademilsとI. Kioskeridisによって検討された<sup>(40)</sup>。2006年に、単一パルス動作のモデルで最適な励磁角を決定するコントロールを用いるSRGの最大エネルギー変換制御の実現が、C. MademilsとI. Kioskeridisにより検討された<sup>(41)</sup>。2008年に、転換電圧の変動を減らすためにSRGの電圧フィードバック制御が、Y. C. ChangとC.M. Liawにより提案された<sup>(42)</sup>。2011年に、SRGは高・低状態でのみ動作するデジタルシステムと見なした新しいデジタル制御技術が、A. Emadiにより提案された。その提案方法の目的はSRGの可変速度動作範囲内で最適な制御パラメータを取得することである<sup>(43)</sup>。2012年に、高速動作条件下において、導通角度を変更することによる3相SRG効率の向上とDCバス電流変動の低減の両方を実現できる制御方法が、Yilmaz Sozerにより提案された。

SRGは、以下の特徴があるため、風力発電システムへの応用が期待されている<sup>(44)</sup>。

- (1) レアアースレスであり、固定子と回転子が鉄心(コア)と巻線(コイル)のみで構成される簡単な構造なため、低メンテナンスコストかつ堅牢という特徴を有する。
- (2) 励磁巻線が各相独立しているため、発電利用係数が高く、長寿命である。
- (3) 永久磁石が用いないため、高温環境に適用できる。
- (4) 可変速範囲が広く、制御系における調整要素が多いため、良好な性能が期待できる。
- (5) 多極機の製作が容易であり、回転子の慣性モーメントを抑えることができるので、良好な可変速性能が期待できる。

図 1.11 に SRG を用いる風力発電システムの構成を示す。SRG は、風力タービンから入力される機械エネルギーを電気エネルギーに変換する。変換器は、SRG を励磁しつつ電力

表 1.2 風力発電機の特徴

Table 1.2. Features of wind power generators.

発電機	構造	利点	欠点	適用範囲
SCIG 	かご形回転子は、棒状の導体の両端を端絡環に溶接又はろう付けする構造になっている。	構造が簡単 堅牢 安価	回転子導体の損失ため、効率があまり高くない。 始動時に大きな突入電流が生じる。	大形風力発電システム
WRIG 	三相結線の巻線形回転子がスリップリングとブラシを介して外部回路に接続できる発電機である。	単独運転できる。 可変速運転できる。	ブラジが消耗品であるため、定期メンテナンスが必要となる。	大形風力発電システム
DFIG	WRIGと同じ構造である。増速機を必要とする。	広い可変速範囲を有する。	増速機がある。	大形風力発電システム
BDFIG	磁路独立の固定子コイルと回転子で構成される。	整流子がない。	複雑な構造である。	大形風力発電システム
PMSG 	固定子コイル、回転子に永久磁石を使用した同期発電機である。	効率が高い。 可変速範囲が広い。 励磁コイルがない。	永久磁石を使用するため、高価である。 制御が難しい。 構造が複雑である。	制限がない。
EES 	固定子コイル、回転子に直流電源を使用する同期発電機である。	可変速範囲が広い。 低コストである。	独立の励磁装置が必要なため、サイズが大きい。	大形風力発電システム

系統へ逆潮流する系統連系の役割を果たす。位置検出器は、SRG の回転子位置を検出する。コントローラは、SRG の回転子位置に応じて励磁制御を行い、力行と回生を制御する。

### 1.3.2 電力変換器

電力変換器は可変速制御システムの核であり、産業機器やその応用システムにおいて、不可欠かつ重要な構成要素となっている。電力変換器は、適用される機器に対してカスタマイズされる回路トポロジーを有する半導体素子を用いた電力変換装置である。電力変換器は、コンバータにより交流 (AC) 電源から直流 (DC) 電力に変換した後、インバータにより AC 電力に再変換する AC-DC-AC 変換器と、DC 電力を介さずに AC 電源から直接異なる振幅と周波数を有する AC 電力に変換する交流-交流 (AC-AC) 変換器に分けられる。表 1.3 に入出力によって分けられる電力変換器の分類を示す。また図 1.12 に電力変換方式の違いを示す。

AC-DC-AC 変換器は、高調波が小さく、力率が高いという利点があるが、DC リンクキャパシタが使われているため、装置全体のサイズが大きくなる。また、DC リンクキャパシタによるエネルギー貯蔵は、2 回のエネルギー変換プロセスを伴うので、エネルギー損失を増加させ、変換器のエネルギー変換効率に悪影響を与える。

AC-AC 変換器は、AC 電源を任意の振幅と周波数を有する AC 電力に直接変換する電力変換装置である。エネルギー貯蔵のための DC リンクキャパシタを介さずに、エネルギー変換を行うことができるので、変換器のエネルギー変換効率が大幅に向上する。また、DC リンクキャパシタとして用いられる電解コンデンサを省略できるので、高寿命、高信頼性、小型化が達成できる。

現在、一般に SRG を発電機として用いる風力発電システムにおいて、SRG と電力系統との間の電力を授受する電力変換装置として、図 1.12 で示す AC-DC-AC 変換器が使用されており、DC リンク部にはキャパシタが使われている<sup>(45)-(47)</sup>。しかし、AC-DC-AC 変換器は、風況によっては起動と停止を繰り返す必要のある小型風力発電システムでは、DC リンクキャパシタを有しているとカットイン時に充電が必要な上に、環境条件により定期的なメンテナンスも必要となるため、発電コストが増加する。また、DC リンクキャパシタの容量によっては SRG の励磁能力を制限するため、SRG の発電可能な運転領域に影響を与える。このような問題に対する改善策として、SRG に適用できる DC リンクキャパシタを用いないキャパシタレス AC-AC 変換器の開発が望まれている。

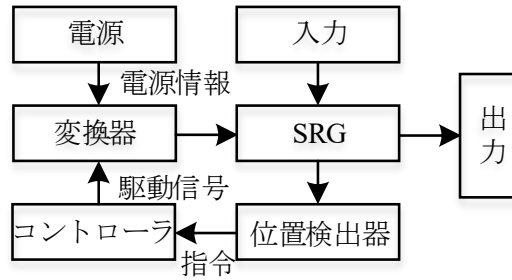


図 1.11 SRG 風力発電システム  
 Fig.1.11. Wind power system using SRG.

表 1.3 電力変換器の分類  
 Table 1.3. Classification of power converters.

出力 \ 入力	AC	DC
DC	整流 (コンバータ)	ダイオード整流
AC	マトリックスコンバータ AC-AC 変換器	逆変 (インバータ)

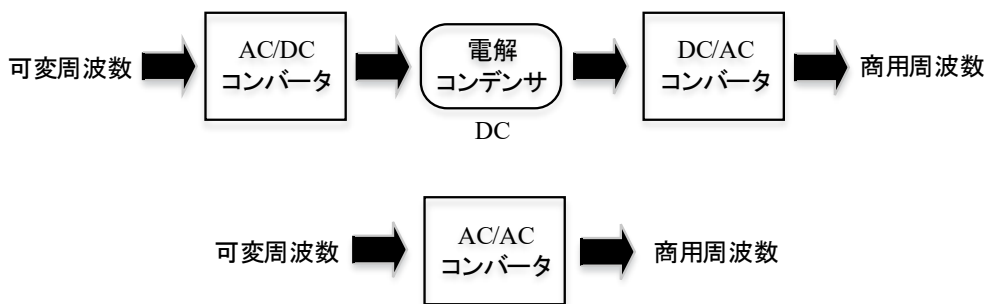


図 1.12 電力変換方式  
 Fig.1.12. Power conversion method.

## 1.4 本論文の目的と構成

前節の通り，化石燃料の枯渇と地球環境問題のため，風力エネルギーの導入が進められている。また，発電機として SRG を用いた風力発電システムにおける課題を述べた。しかし，キャパシタレスにて SRG を変速制御しつつ系統連系できる回路トポロジーについて検討はまだなされておらず，報告例がない。

本研究では SRG の可変速風力発電システム (VSPWGS) へ適用を前提とするキャパシタレス AC-AC 変換器の回路トポロジーを提案する。提案する回路トポロジーでは，一般的な SRG を駆動する非対称ハーフブリッジ回路とは異なり，マトリックスコンバータ(MC)に基づいて回路トポロジーを有する。また，キャパシタレス AC-AC 変換器による SRG の励磁方法を提案し，風速変化に対して風車回転数を適切に制御できる速度制御系を提案する。Matlab/Simulink で全体システムのモデルを構築し，SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器による VSPWGS について理論検証を行うことを目的とする。図 1.14 に，風力発電システムの構成とその構成要素において検討すべき課題を整理し，本論文で取り扱う課題を太枠で示した。

以下に本論文の構成ならびに概要を記す。

第 1 章では，文献調査に基づいて本研究の背景として風力発電の現状を紹介して，風力エネルギーは化石燃料の枯渇と環境問題を緩和する有効方法を指摘する。現在の風力発電システムで使われている発電機をまとめる。SRG も包括する。風力発電システムに適する SRG の利点を述べるとともに，キャパシタを使用しない AC-AC 変換器を提案する。全文の内容を概括する。

第 2 章では，SRG の構造と動作原理を述べる。SRG の構造と動作原理について説明した上で，SRG の数学モデルを提案する。また，SRG のインダクタンスと回転子位置の関係を分析し，発電原理の解析を行う。更に SRG の三つ制御方法を検討する。

第 3 章では，SRG に適する電力変換器を簡単に述べた後に MC をベースとしており，SRG に適用するキャパシタレス AC-AC 変換器の構造，基本原理と転流方式を説明する。

第 4 章では，以上の考察に基づいて，SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器による VSWPGS の理論検証を行うために，VSWPGS を構成する全ての要素のモデリングは Matlab/Simulink 上で構築する。その中で，風車は翼素理論による Matlab プログラムを作成する。SRG は有限要素法による静磁場解析を行うことで得られる解析データに基づいて作成する。キャパシタレス AC-AC 変換器は Matlab/Simulink における Simscape を用いて構築する。風速を変化させた場合に全体システムのシミュレーションを行う。

第 5 章では，本研究で得られた研究成果をまとめ，また，今後の研究課題について記す。

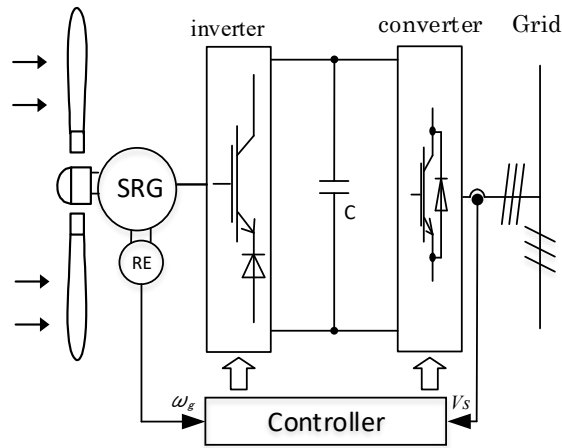


図 1.13 AC-DC-AC 変換器を用いて SRG 風力発電システム  
 Fig.1.13. SRG wind powers system using AC-DC-AC converter.

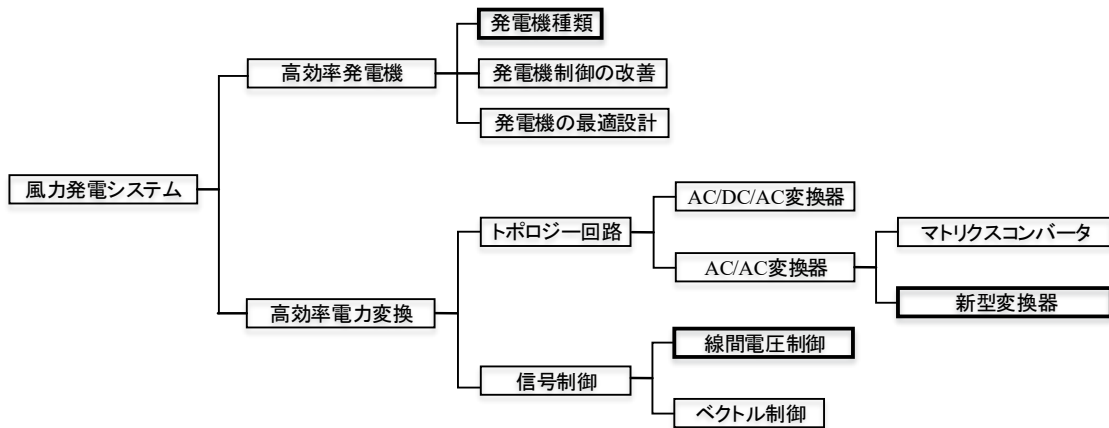


図 1.14 風力発電システムの構成  
 Fig.1.14. Structure of the wind power system.

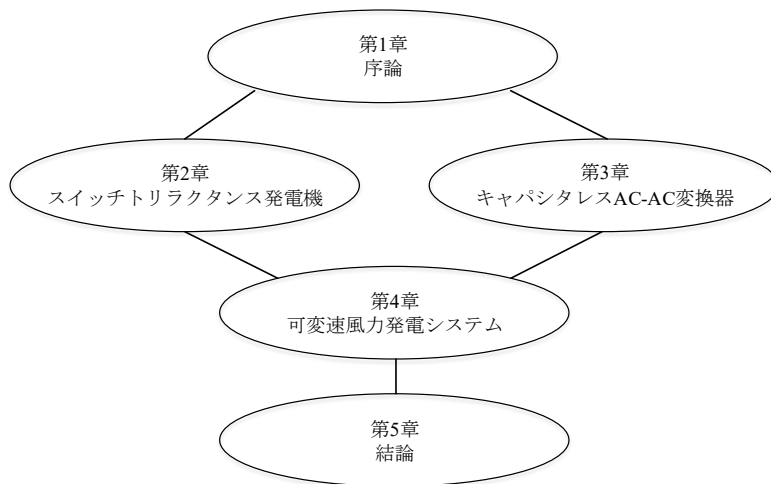


図 1.15 論文の構成  
 Fig.1.15. Structure of thesis.

## 第二章 スイッチトリラクタンس発電機

### 2.1 スイッチトリラクタンس発電機の構造

スイッチトリラクタンس発電機(SRG)は、固定子と回転子の突極構造に起因する磁気抵抗の変化によって生じる誘導起電力により、コイル電流を電源側に回生するモードを中心として運転される。図 2.1 に実際の SRG の回転子と固定子を示す。固定子と回転子の鉄心(コア)はケイ素鋼板を回転軸方向に積層することで構成される。励磁回路としては、集中巻コイルを固定子側に配置するだけの極めて簡単な構造なため、堅牢かつ安価という特徴を有する。また、永久磁石を使用しないため、高温環境下において減磁の問題がない。

SRG はコア形状、コイル仕様、相数、極数など設計の自由度が大きい。表 2.1 に SRG の固定子と回転子の組み合わせを示す。二相電源で駆動する場合は、固定子 4 極と回転子 2 極(4/2 極)の組み合わせが一般的である。三相電源で駆動する場合は、固定子 6 極と回転子 4 極(6/4 極)、四相電源で駆動する場合は、固定子 8 極と回転子 6 極(8/6 極)、五相電源で駆動する場合は、固定子 10 極と回転子 8 極(10/8 極)、六相電源で駆動する場合は、固定子 12 極と回転子 10 極(12/10 極)という組み合わせがある。極数と相数の組み合わせは、発電機の運転性能と経済性に直接に影響する。現在のところ、三相電源で駆動することを前提とし、6/4 極および三相 12/8 極スイッチトリラクタンس発電機が最も多く検討されている。本研究では、風車タービンの回転域とのマッチングを図り易い 12/8 極の SRG を使用する<sup>(48)</sup>。

### 2.2 スイッチトリラクタンス発電機の原理

図 2.2 に示す三相 12/8 極 SRG について、動作原理を詳細に説明する。同図には U 相回路のみを示しているが、V、W 相とも U 相と同じ回路を有する。回路中の S1 と S2 は、外部回路によりオンオフの制御が可能な IGBT であり、VD1 と VD2 は IGBT をオフしたときの電流経路を確保するためのフリーホイーリングダイオードである。

SRG の電気トルクは、固定子と回転子の間のエアギャップによる磁気抵抗の変化があるときに、磁気抵抗が最小となる位置に回転子が移動する力を発生するために生じる。磁束が磁気抵抗の最小となる経路に沿って流れているときに最も安定な状態にあり、回転子には力が発生しない。逆に、回転子と固定子の突極部が一致せず、回転子の移動によって磁気抵抗が小さくなる状態にあれば、回転子が安定な状態に移動しようとする力が発生する

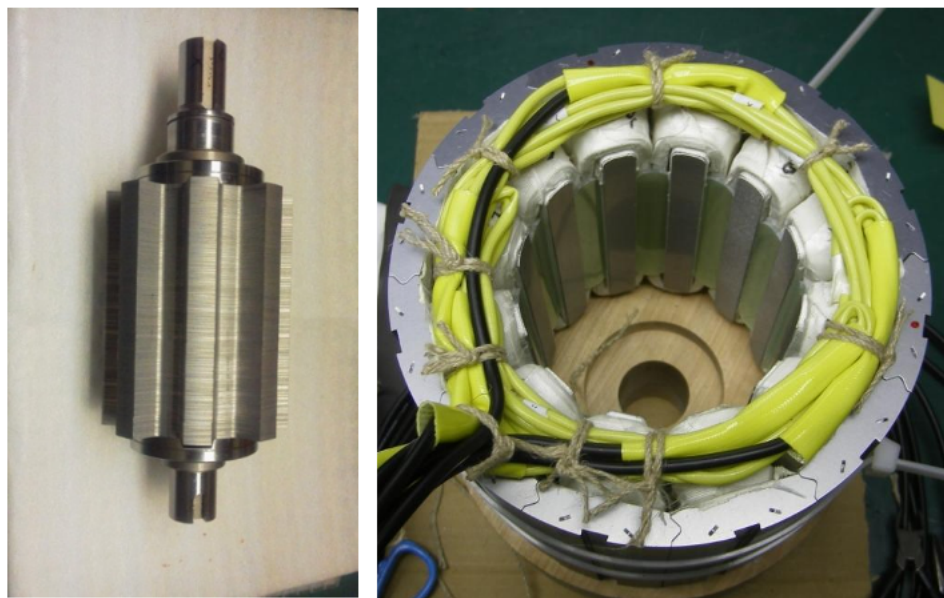


図 2.1 SRG の回転子と固定子  
 Fig. 2.1. Rotor and stator of SRG.

表 2.1 SRG の固定子と回転子の組み合わせ  
 Table 2.1. Combinations of SRG stator and rotor.

相数	2	3	4	5	6
固定子	4	6	8	10	12
回転子	2	4	6	8	10



ため、磁気抵抗が最小となる位置に向かうトルクを生成する。図中 U 相の固定子コア突極と回転子コア突極が完全対向位置にあるとき、U 相の磁気抵抗が最小となり、U 相インダクタンスが最大となる。SRG とスイッチトリラクタンスモータ (SRM) の構造は同じであり、主に力行モードで運転する場合は SRM と呼び、主に回生モード (発電モード) で運転する場合は SRG と呼ぶ。SRM としての動作を説明すると、U-V-W の順番で各相コイルを励磁することで、回転子は反時計方向に回転し、逆に W-V-U に順番に励磁すると、回転子が時計方向に回転する。また回転方向の電磁力は吸引のみを使用するので、回転方向は電流の正負とは関係なく、励磁相の順番により決まる。

U 相スイッチ S1 および S2 をオンすると、U 相コイルへの通電が開始される。U 相コイルによって UU' を磁路とする磁束が確立すると、回転子には U 相巻線軸方向への電磁力が発生し、回転子には磁気抵抗が最小となる回転方向への電磁力が発生する。固定子と回転子の突極部が完全対向位置にあるとき、磁気抵抗が最小となるので、回転方向への電磁力はゼロとなる。

U 相コイルが励磁されているときにスイッチ S1 および S2 をオフすると、U 相コイルが誘起電圧を発生するため、励磁電流が維持され VD1 と VD2 を介して流れる。励磁コイルの電流方向は変化しないため、U 相コイルと電氣的に接続される電源の極性は逆になる。この過程において、磁気回路中に蓄えられていた磁気エネルギーは電気エネルギーとして電源に戻される。

各相のコイルを 1 パルスだけ励磁したときに回転する回転角をステップ角と呼び、次式で定義する。

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{mN_r} \quad (2.1)$$

ここで、 $m$  は相数、 $N_r$  は回転子極数である。12/8 極 SRG の場合は、 $m=3$ 、 $N_r=8$  なので、ステップ角  $\varepsilon$  は  $15^\circ$  となり、24 ステップで 1 回転することがわかる。

図 2.3 に SRG の回転原理を示す。V 相の固定子と回転子が完全対向位置にあるときを基準位置とし、回転子位置  $\theta$  を  $0[\text{deg}]$  と定義する。SRG は、回転子に励磁電流が印加されると、その回転子と最も近い位置関係にある回転子を取り寄せられる。図 2.3 で示すように V 相から W 相に向けて励磁電流を流すと、回転子が W 相の固定子に取り寄せて、反時計方向のトルクを発生する。反時計方向に回転し、励磁電流を印加する相を V 相から W 相切り替える。この繰り返しにより、反時計方向のトルクを発生し続けて、SRG の回転子は反時計方向の回転を維持できる。回転子初期位置にある場合は、W 相から U 相、V 相へ切り替えて励磁される。

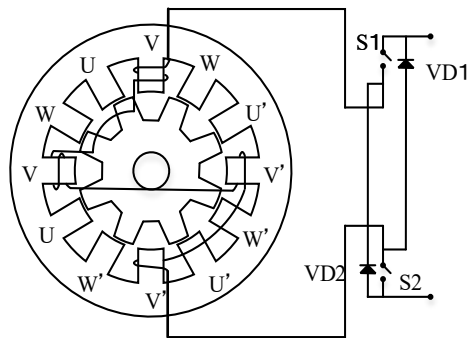


図 2.2 三相 12/8 極 SRG  
 Fig. 2.2. Three phase 12/8 SRG.

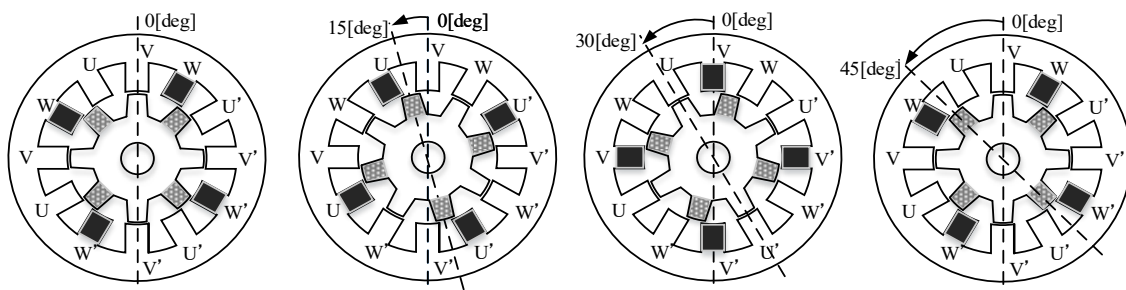


図 2.3 SRG の回転原理  
 Fig. 2.3. SRG rotation principle.

## 2.3 スイッチトリラクタンس発電機の基礎理論

### 2.3.1 SRG の数学モデル

1 相分の SRG の等価回路を図 2.4 に示す。各相コイルの鎖交磁束  $\Psi$  は、固定子と回転子のコアが共に突極構造を有し、コアで生じる磁気飽和、ステリシス現象、そして渦電流の影響を受けるため、コイル電流  $i$  には比例しない。ここでは、SRG の基本的な原理を説明するために、磁気飽和と回転子位置の影響のみを考慮し、インダクタンス  $L$  は、回転子位置  $\theta$  と  $i$  の関数とする。 $\psi$  は  $L$  と  $i$  の積で表わされる。

$$\psi(\theta, i) = L(\theta, i) i \quad (2.2)$$

各相コイルの端子電圧  $v$  は、巻線抵抗  $R$  による電圧降下とコイルの誘導起電力の和で表わされる。

$$v = Ri + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} \quad (2.3)$$

$\psi$  は固定子の誘起電圧を積分する次式を用いて得られる。

$$\psi(\theta, i) = \int (v - Ri) dt \quad (2.4)$$

式(2.2), (2.3)から電流はインダクタンス  $L$ , 次式で表わされる。

$$i = \frac{\psi(\theta, i)}{L(\theta, i)} = \frac{\int (v - Ri) dt}{L(\theta, i)} \quad (2.5)$$

SRG が速度一定で運転されている場合は、式(2.3)は次式のように書き表わされる。

$$v = Ri + \frac{d\psi(\theta, i)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\psi(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = Ri + l \frac{di}{dt} + e \quad (2.6)$$

但し、 $l = d\psi(\theta, i)/di$ : 増分インダクタンス,  $e = d\psi(\theta, i)/d\theta \cdot \omega_r$ : 速度起電力である。ここで、誘導起電力係数  $K$  を次式で定める。

$$K = \frac{d\psi(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.7)$$

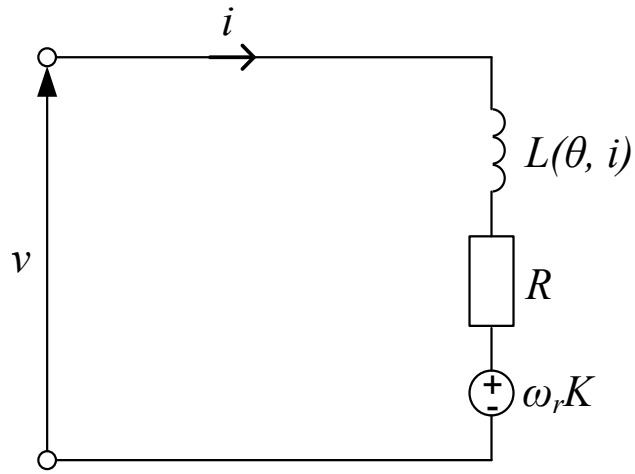


図 2.4 一相分の SRG 等価回路  
 Fig. 2.4. Equivalent circuit of SRG for one phase.

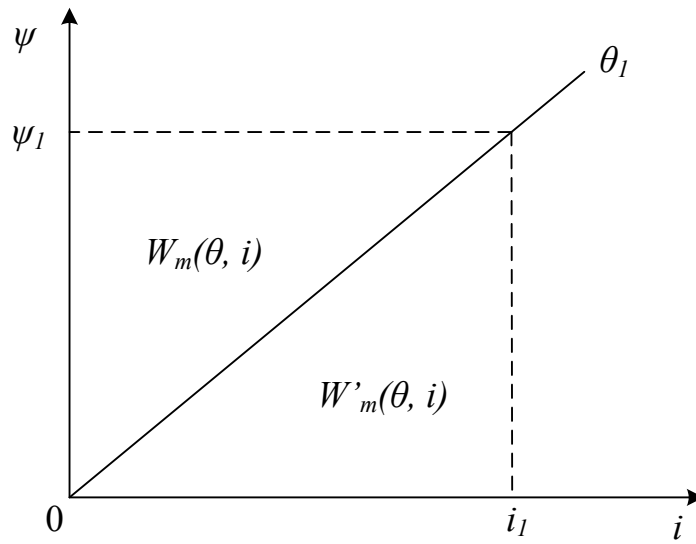


図 2.5 磁気回路が線形と見なす時の磁化曲線  
 Fig. 2.5. Magnetization curve of linear magnetic circuit.

式(2.7)を用いると、速度起電力  $e$  は次式となる。

$$e = K \omega_r \quad (2.8)$$

また、磁気回路を線形と見なす場合、式(2.3)は以下の式で表わされる。

$$v = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + e \quad (2.9)$$

ただし、 $e = \omega_r i dL(\theta) / d\theta$  :速度起電力である。

非線形の場合と同様に  $dL(\theta) / d\theta$  の項を誘導起電力係数と呼び、次式のように定数として扱う。

$$K = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.10)$$

磁束鎖交数が回転子位置によって決まるため、動作点によって値が変化する。式(2.10)を用いて速度起電力を表すと以下のようなになる。

$$e = \omega_r i K \quad (2.11)$$

固定子コアと回転子コアの突極が非対向位置にあるときに励磁電流を通電すると、インダクタンスが最小となる位置に回転子が移動しようとする力が生じる。また固定子コアと回転子コアの突極が完全対向位置にあるときは力が発生しない。回転子が移動するとき、励磁電流によってインダクタンスに蓄えられる磁気エネルギーの一部が、機械エネルギーとして消費される。つまり磁気エネルギーの減少分をそのときの  $\theta$  の変化分で除することでトルク計算できる。磁気エネルギー  $W_m$  は次式で定義される。

$$W_m = \int_0^t v i dt = \int_0^t i \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} dt = \int_0^\psi i d\psi \quad (2.12)$$

図 2.5 で示すように磁気特性が線形な場合、 $\psi$  は  $i$  に比例するので、 $W_m$  と磁気随伴エネルギー  $W_m'$  の値は同じとなる。つまり、 $\psi(\theta, i) = L(\theta) i$  より、次式が得られる。

$$W_m = W_m' = \int_0^i \psi(\theta, i) di = \int_0^i L(\theta) i di = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (2.13)$$

SRG の 1 相分のトルク  $T$  は、機械エネルギーに変換される  $W_m$  の微小変化分  $\Delta W_m$  を  $\theta$  の微小変化分  $\Delta \theta$  で除することで得られる。また  $T$  の正方向を  $\theta$  と同じ方向に定義すると、 $W_m$  が減少するときに正トルクが生じることになるので、方向の整合性をとるためにマイナ

ス記号を付す必要がある。また微小変化分  $\Delta$  を偏微分演算子  $\partial$  に置き換えることで次式が得られる。

$$T(\theta, i) = -\frac{\Delta W_m(\theta, i)}{\Delta \theta} = -\frac{\partial W_m(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.14)$$

$W_m'$  と  $W_m$  は変化の方向が逆なので、マイナス記号をプラス記号に変更することで、次式が得られる。

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W_m'(\theta, i)}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (2.15)$$

磁気回路の性質が線形であるときの機械エネルギーに変換される磁気随伴エネルギー  $\Delta W_m$  は、図 2.6 におけるハッチングされている面積で示される。

磁気回路の性質が非線形な場合は、図 2.7 のように電流によって磁束鎖交数の傾きが変化するため、インダクタンスの  $i$  に対する変化を考慮する必要がある。従って、 $T$  を計算するときに増分インダクタンス  $l$  を用いなければならない。磁気回路の性質が非線形であるときの機械エネルギーに変換される磁気随伴エネルギー  $\Delta W_m$  は、図 2.8 におけるハッチングされている面積で示される。

### 2.3.2 SRG のトルクおよびインダクタンス

磁気回路における磁気飽和の影響を無視し、各相コイルのインダクタンスが励磁電流によって変化しないと仮定する。このとき回転子位置の変化による磁気抵抗の影響だけを受け、インダクタンスは周期的に変化する。これまで用いてきた回転子位置  $\theta$  は、固定子基準軸における回転子の機械的な 1 回転 (360 度回転) を 1 周期としているので、ここで新たに機械角  $\theta_{mech}$  として定義する。またインダクタンスの周期的な変化は回転子の極数によって変化するため、機械角においてインダクタンスを表現すると極数によって現れる周期数が異なるため、極数の異なる SRG の各種特性の比較が難しい。そこで、インダクタンスの周期が、各コイルを励磁する電圧電流の周期と等しいことに着眼し、その 1 周期を 360 度とする電気角  $\theta_{elec}$  を定義する。回転子の極数を  $N_r$  と定義すると、 $\theta_{mech}$  と  $\theta_{elec}$  の関係は、次式で与えられる。

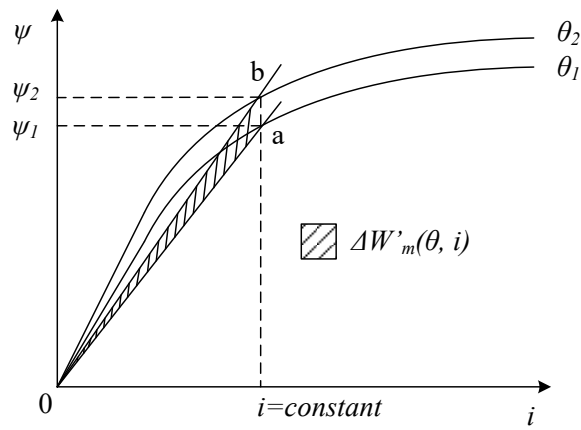


図 2.6 磁気回路の性質が線形であるときの磁気随伴エネルギー  
 Fig. 2.6. Magnetic coenergy of linear magnetic circuit.

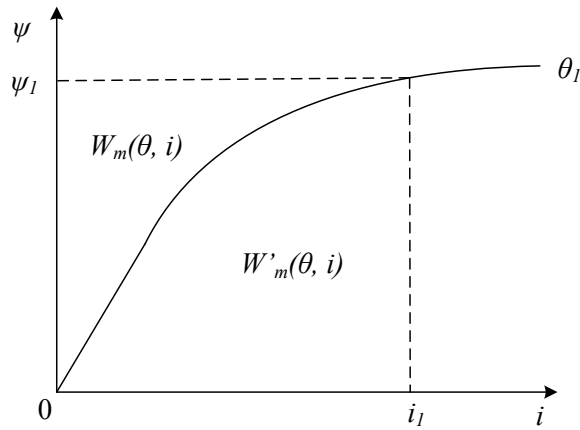


図 2.7 磁気回路を非線形と見なす時の磁化曲線  
 Fig. 2.7. Magnetization curve of nonlinear magnetic circuit.

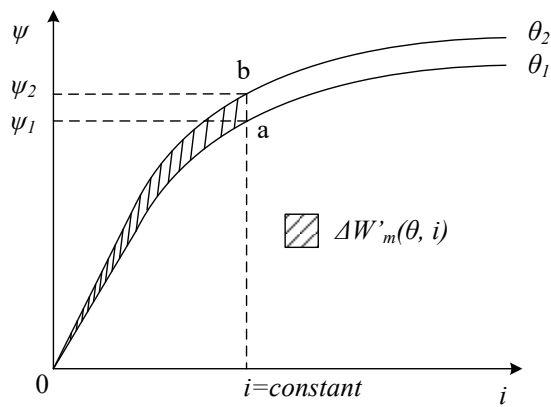


図 2.8 磁気回路の性質が非線形であるときの磁気随伴エネルギー  
 Fig. 2.8. Magnetic coenergy of nonlinear magnetic circuit.

$$\theta_{elec} = N_r \theta_{mech} \quad (2.16)$$

可変速風力発電システムに適用する固定子 12 極/回転子 8 極の SRG の場合，そのインダクタンスは，固定子と回転子の突極部が対向位置 ( $\theta_{mech}=22.5$  度， $\theta_{elec}=180$  度) にあるとき最大となり，非対向位置 ( $\theta_{mech}=0$  度， $45$  度， $\theta_{elec}=0$ ， $360$  度) にあるとき最小となる。図 2.9 に  $\theta_{mech}$  に対するインダクタンスの変化を示す。

図 2.10 で示している初期位置 ( $\theta_{mech}=\theta_{elec}=0$  度) を基準として，SRG を特徴付ける回転子位置について説明する。 $\theta_1$  は次式で与えられる。

$$\theta_1 = \frac{\tau_r - (\beta_r + \beta_s)}{2} \quad (2.17)$$

ここで， $\tau_r=2\pi/P_r$  は回転子極弧， $P_r$  は回転子極数， $\beta_r$  は回転子極弧， $\beta_s$  は回転子極弧である。また， $\theta_2$  および  $\theta_3$  は次式により与えられる。

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s = \frac{\tau_r - (\beta_r - \beta_s)}{2} \quad (2.18)$$

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) = \frac{\tau_r + (\beta_r - \beta_s)}{2} \quad (2.19)$$

負トルク領域における  $\theta_4$  は次式で得られる。

$$\theta_4 = \theta_3 + \beta_s \quad (2.20)$$

線形モデルに基づいて SRG の巻線インダクタンスは：

$$L(\theta_{mech}) = \begin{cases} L_{\min} & 0^\circ \leq \theta_{mech} \leq \theta_1 \\ K(\theta_{mech} - \theta_1) & \theta_1 \leq \theta_{mech} \leq \theta_2 \\ L_{\max} & \theta_2 \leq \theta_{mech} \leq \theta_3 \\ L_{\max} - K(\theta_{mech} - \theta_3) & \theta_3 \leq \theta_{mech} \leq \theta_4 \end{cases} \quad (2.21)$$

ここで， $K=(L_{\max}-L_{\min})/(\theta_2-\theta_1)$ 。式(2.15)を式(2.21)式に代入することによって 1 相分のトルク T が得られる。



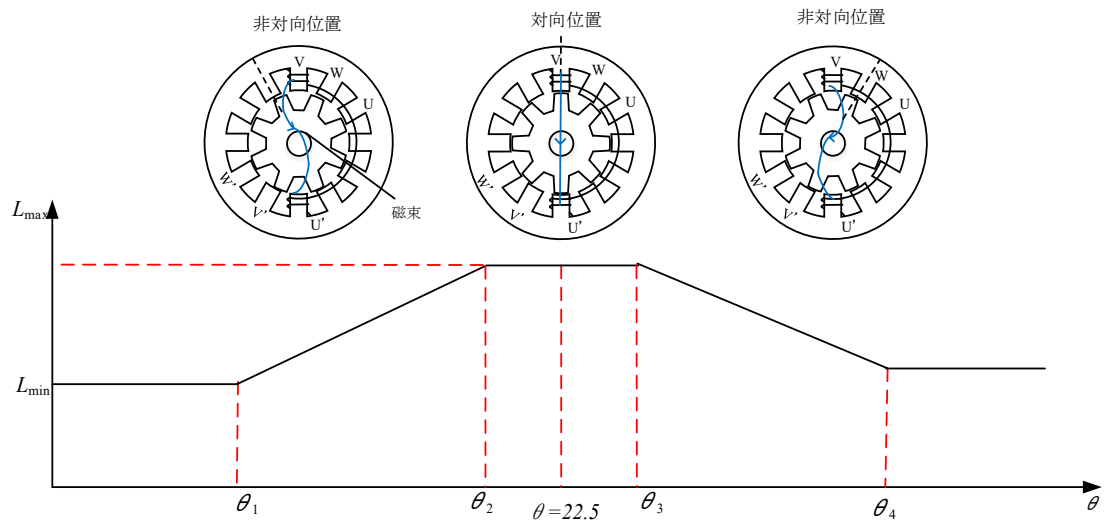


図 2.9 インダクタンスと回転子位置角の関係  
 Fig. 2.9. Relationship between the rotor position and inductance.

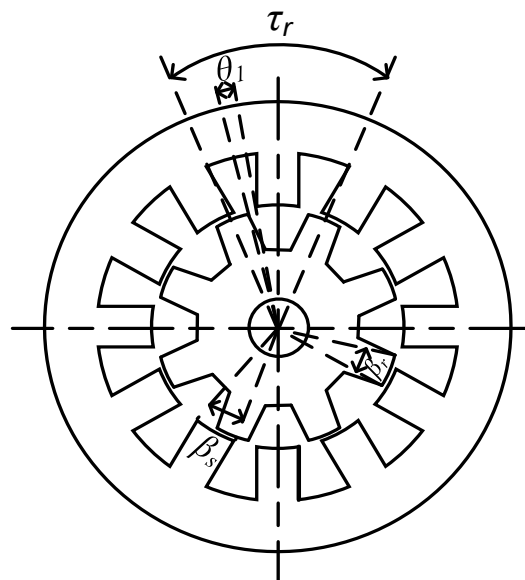


図 2.10 回転子極位置の定義  
 Fig. 2.10. Definition of rotor position.

$$T(\theta_{mech}) = \begin{cases} 0 & 0^\circ \leq \theta_{mech} \leq \theta_1 \\ \frac{Ki^2}{2} & \theta_1 \leq \theta_{mech} \leq \theta_2 \\ 0 & \theta_2 \leq \theta_{mech} \leq \theta_3 \\ -\frac{Ki^2}{2} & \theta_3 \leq \theta_{mech} \leq \theta_4 \end{cases} \quad (2.22)$$

式(2.22)より  $T$  は、 $i$  の 2 乗に比例し、その方向は  $i$  の正負とは関係がなく、 $\partial L(\theta, i)/\partial \theta$  の正負により決まることが分かる。図 2.9 で示すように、 $\theta_1$  から  $\theta_2$  までの区間では  $\theta_{mech}$  が増加すると、磁路におけるギャップの割合が減少して磁気抵抗が減少するため、 $L(\theta)$  が増加する。この区間では  $\partial L(\theta)/\partial \theta > 0$  なので正方向の  $T$  が発生する。逆に  $\theta_3$  から  $\theta_4$  までの区間では  $\theta$  が増加すると、磁路におけるギャップの割合が増加し磁気抵抗が増加するため、 $L(\theta)$  が減少する。この区間では  $\partial L(\theta)/\partial \theta < 0$  なので負方向の  $T$  が発生する。つまり  $i$  の通電区間と値を調整することにより  $T$  を制御できる。

## 2.4 スイッチトリラクタンス発電機の発電原理

相電流とインダクタンスの関係を図 2.11 に示す。励磁開始角  $\theta_{on}$  から  $\theta_2$  まではインダクタンスが増加する区間にあるので、回転子の突極部には固定子の突極部に引き寄せられる方向へのトルクが発生する。このとき、端子電圧と相電流の方向が一致しており、電源側から電気エネルギーが供給されている。 $\theta_2$  から  $\theta_3$  までは、固定子極と回転子極が重なり、インダクタンスの上昇が鈍るので、相電流の上昇が維持される。 $\theta_3$  から励磁終了角  $\theta_{off}$  まではインダクタンスが減少する区間であり、通過した回転子の突胸部には固定子の突極部に引き戻される方向へのブレーキトルクを発生する。インダクタンスが最小となるまでに、相電流は減衰して零になる。この区間では、コイルで生じる誘起電圧により電源側に相電流が逆流し、発電機として動作している。

発電動作における機械エネルギーから電気エネルギーへのエネルギー変換について考察する。図 2.11 の電流波形に対応する鎖交磁束数-電流の軌跡を図 2.12 に示す。外部から供給される機械エネルギー  $W_{mech}$  は、磁気回路中に蓄えられる磁気エネルギー  $W_{mag}$  と外部負荷装置に出力される電気エネルギー  $W_{elec}$  の和となる。つまり、エネルギー保存の法則に基づき、各エネルギーの微小変化分の関係は次式で与えられる。

$$dW_{mech} = dW_{mag} + dW_{elec} \quad (2.23)$$

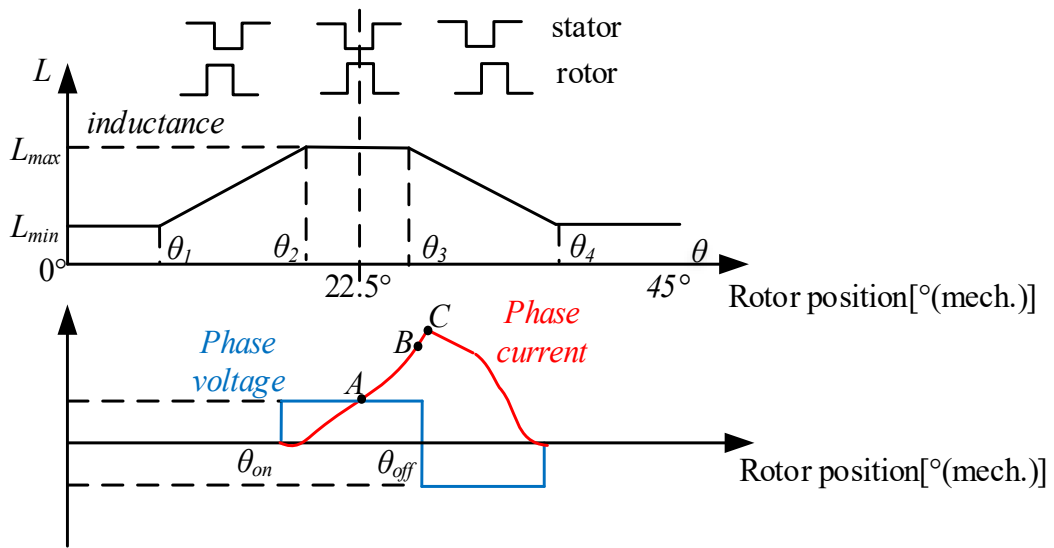


図 2.11 相電流とインダクタンスの関係

Fig. 2.11. Relationship between the phase current and inductance.

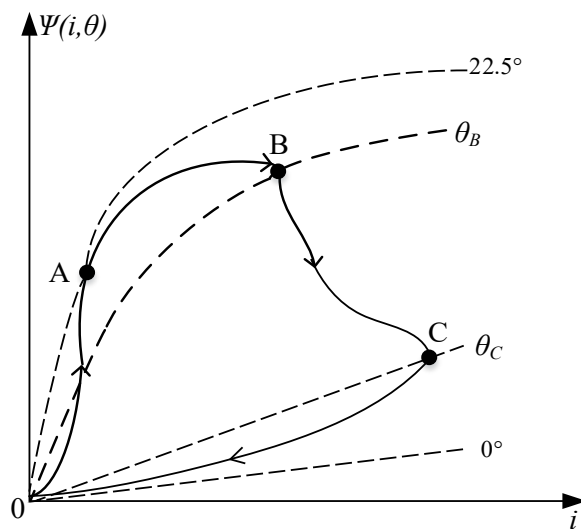


図 2.12 鎖交磁束数-電流の軌跡

Fig. 2.12. Flux-current trajectory.

力行モードにおける原点から状態 A までのエネルギー変換の過程を図 2.13 に示す。ここでは、 $\partial L(\theta)/\partial \theta > 0$  であり、正方向の  $T$  が発生する区間での動作を仮定する。原点から電流  $i$  を印加して状態 A に至るまでに、電源から電気エネルギーが供給され、同図(a)においてハッチングされた領域に相当する磁気エネルギーが磁気回路中に蓄えられる。次に状態 A から  $i$  を減じて原点に戻る過程において、同図(b)においてハッチングされた領域に相当する磁気エネルギーが電源側に返還されるが、同図(a)で示した磁気エネルギーよりも小さい。このときの磁気エネルギーの減少分は、同図(c)においてハッチングされた領域に相当し、機械エネルギーとして消費される。

回生モードにおける状態 A から状態 B までのエネルギー変換の過程を図 2.14 に示す。ここでは、 $\partial L(\theta)/\partial \theta > 0$  であり、正方向の  $T$  が発生する区間での動作を仮定する。状態 A から  $i$  を印加して状態 B に至るまでに、電源から電気エネルギーが供給され、同図(a)においてハッチングされた領域に相当する磁気エネルギーが磁気回路中に蓄えられる。次に状態 B から  $i$  を減じて原点に戻る過程を想定すると、同図(b)においてハッチングされた領域に相当する磁気エネルギーが電源側に返還されるが、同図(a)で示した磁気エネルギーよりも大きくなるのが分かる。このときの磁気エネルギーの増加分は、同図(c)のハッチングされた領域に相当し、外部から供給された機械エネルギーが電気エネルギーに変換されて出力されることになる。

図 2.14 における状態 B から状態 C を介して原点まで戻る過程を図 2.15 に示す。ここでも  $\partial L(\theta)/\partial \theta < 0$  であり、負方向の  $T$  が発生する区間での動作を仮定する。また状態 B の時点で電源と逆接続されると仮定する。状態 B から状態 C に至るまで、磁束鎖交数の急激な減少によりコイルが誘起電圧を発生し、この誘起電圧が電源電圧を上回るため  $i$  が増加し続ける。状態 C から原点に戻る過程において、磁束鎖交数の減少が鈍化すると誘起電圧と電源電圧がバランスし  $i$  が減少する。以上の過程において、同図(a)においてハッチングされた領域に相当する磁気エネルギーが電源側に返還されるが、同図(b)においてハッチングされた領域に相当する磁気エネルギーは、状態 B に至るまでに電源側から供給されていたことになるので、外部から供給された機械エネルギーが電気エネルギーに変換された分に相当する磁気エネルギーは、同図(c)においてハッチングされた領域に相当する。

図 2.13 から図 2.15 で説明した三つの過程において、外部から供給された機械エネルギーから磁気エネルギーを介して変換される電気エネルギーに相当する領域は図 2.16 においてハッチングされた領域に相当する。つまり SRG の発電動作は、磁化曲線上において、原点から出発して時計回りして原点に戻る過程を繰り返し、磁化曲線で囲まれた領域に相当する電気エネルギーを機械エネルギーから得ることを状態と考えられる。

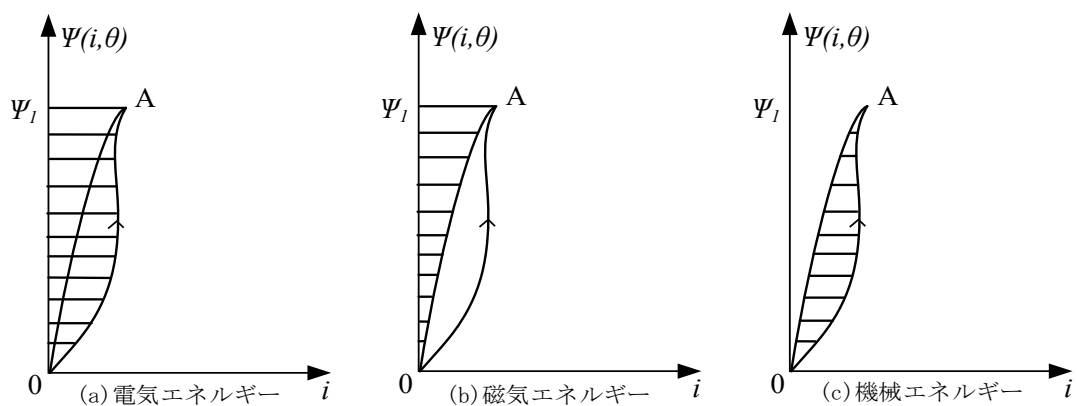


図 2.13 原点から状態 A までのエネルギー変換の過程  
 Fig. 2.13. The process of energy conversion loop from zero point to state A.

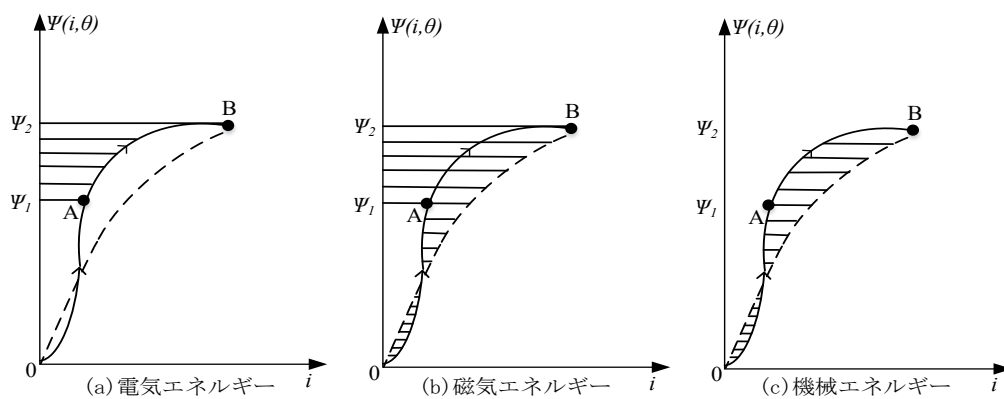


図 2.14 状態 A から状態 B までのエネルギー変換の過程  
 Fig. 2.14. The process of energy conversion loop from state A to state B.

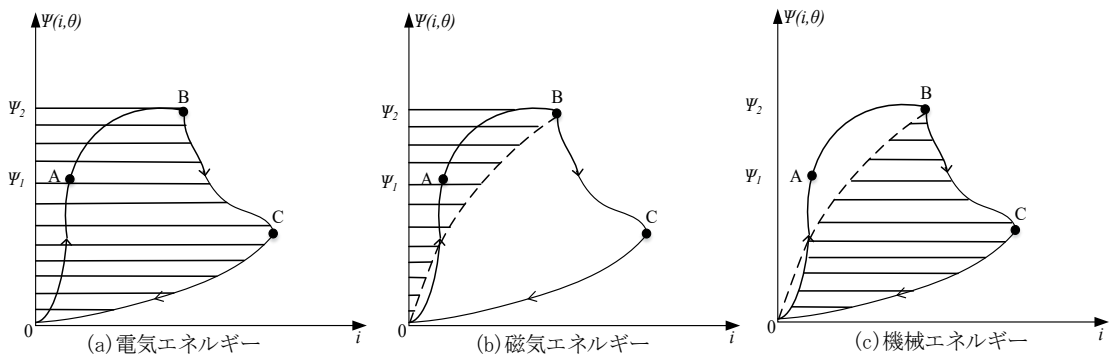


図 2.15 状態 C を介して状態 B から原点に戻るまでのエネルギー変換の過程  
 Fig. 2.15. The process of energy conversion loop from state B to zero point via state C.

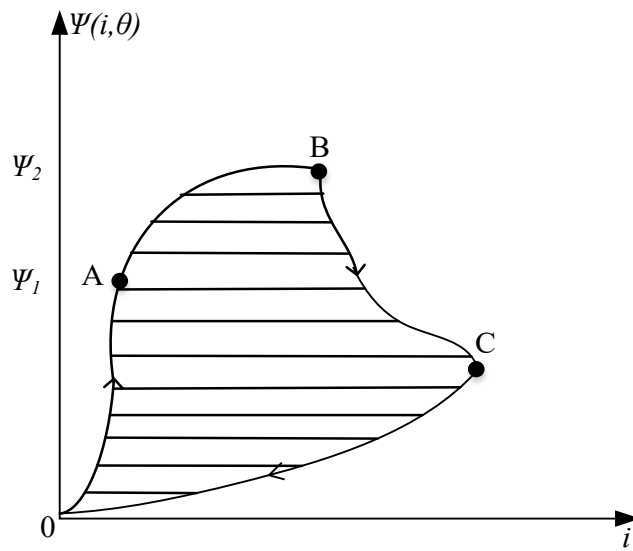


図 2.16 発電運行のエネルギー出力  
 Fig.2.16. The output of power generation operation.

## 2.5 スイッチトリラクタンス発電機の制御方法

スイッチトリラクタンス発電機の発電量の制御は、基本的に励磁開始角と励磁終了角を操作量として行われる。操作量として励磁開始角と励磁終了角のみを用いる角度位置制御 (Angular Position Control, APC) 方式に加え、印加電圧の大きさを併せて調整する電圧制御 (Voltage Control, VC) 方式、そして相電流の大きさを制限する電流チョッピング制御 (Current Chopping Control, CCC) 方式が用いられる。制御方式はスイッチトリラクタンス発電機の発電性能を決定づける大きな要素である。以下に、各制御方法について簡単に紹介する。

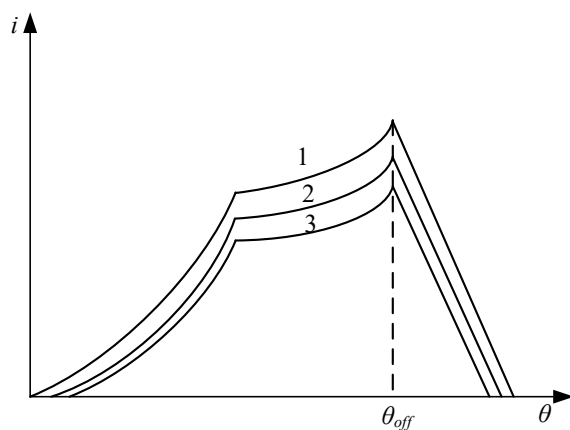
### 2.5.1 角度位置制御 (APC) 方式

APC 方式は、励磁の開始と終了の区間を変更して、励磁電圧の通電期間を調整する方式である。励磁電圧が印加される期間を調整することによって、相電流とトルクを調整することにより速度制御を実現する。

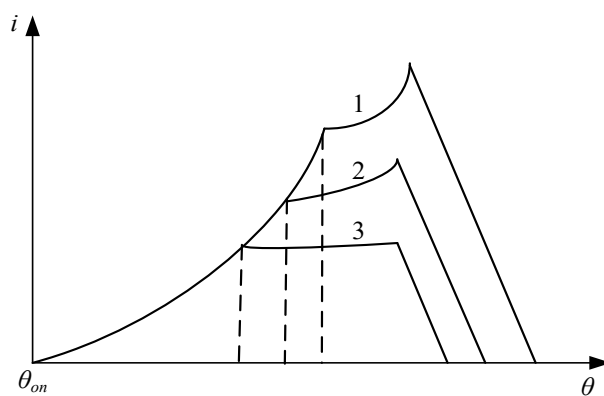
励磁区間の調整方法として、励磁開始角のみを変更する方式、励磁終了角のみを変更する方式、および励磁開始終了角を同時に変更する方式の 3 方式がある。図 2.17(a)で示す励磁開始角のみを変更する方式では、相電流の立ち上がりのタイミングと最大値を調整することにより、トルクの大きさを制御できる。また図 2.17(b)で示す励磁終了角のみを変更する方式では、相電流の最大値の調整が難しいが、相電流の通電期間、つまり電流実効値を調整することにより、トルクの大きさを制御できる。一方、励磁開始角と励磁終了角を同時に変更する方式は、先の 2 方式の利点を併せ持つことになるが、励磁開始終了角の調整アルゴリズムは複雑なものとなる。

スイッチトリラクタンス発電機では、相電流の通電期間が変更されると、インダクタンスの変化の状態に応じて、力行モードと回生モードなど動作状態が目まぐるしく変化する。相電流がインダクタンスの増加領域にある場合は、スイッチトリラクタンス発電機であっても力行モードの状態 (電動機の状態) で動作する。逆に、相電流がインダクタンスの減少領域にある場合は、スイッチトリラクタンスモータであっても回生モードの状態 (発電機の状態) で動作する。

角度位置制御は、可変速制御するためにトルク制御を行う場合において、インバータにおけるスイッチング動作を最小限に抑えることができるので、インバータでのスイッチング損失が小さくなる。従って、広い制御範囲で様々な負荷条件の下で可変速制御を行う際に、システム全体の効率を高く維持できることが期待できる。



(a) 固定 $\theta_{off}$



(b) 固定 $\theta_{on}$

図 2.17 角度位置制御方式 (APC 方式) の概念図

Fig.2.17. The conceptual diagram of angular position control (APC) method.



### 2.5.2 電圧制御 (VC) 方式

与えられた励磁開始角と励磁終了角の条件下において、電圧制御方式は各相巻線に印加する励磁電圧の大きさをパルス幅変調 (PWM) によって調整する。具体的には、設定された周期に対する励磁電圧を印加する期間の比(デューティー比)を調整する。図 2.18 に PWM によって励磁電圧を調整している例を示す。

PWM 制御方式は制御性が良く、励磁電圧を PWM 波形の周期とデューティー比を制御することで電流を調整することで、速度制御系において操作量としたいトルクを制御できる。この方式のデメリットとしては、PWM 変調する際にスイッチングデバイスは高いスイッチング周波数に耐えることが必要である上に、スイッチングデバイスの電力損失が実質的に増加する。

### 2.5.3 電流制御 (CCC) 方式

CCC 方式は、基本的な考え方は APC と同じである。制御原理は、相電流がゼロから設定電流上限値まで上昇すると、スイッチングが直ちにオフとなり、巻線には逆電圧 (電源の逆接続) またはゼロ電圧 (フリーホイーリング動作) が印加される。電流が設定電流下限まで減少したら、スイッチング動作が再開する。1 回の励磁区間において、上記のプロセスが繰り返されると、図 2.19 に示すように電流が上限値に制御される。この方式は実機での実現が簡単であるため、一般的に使用される制御方法である。

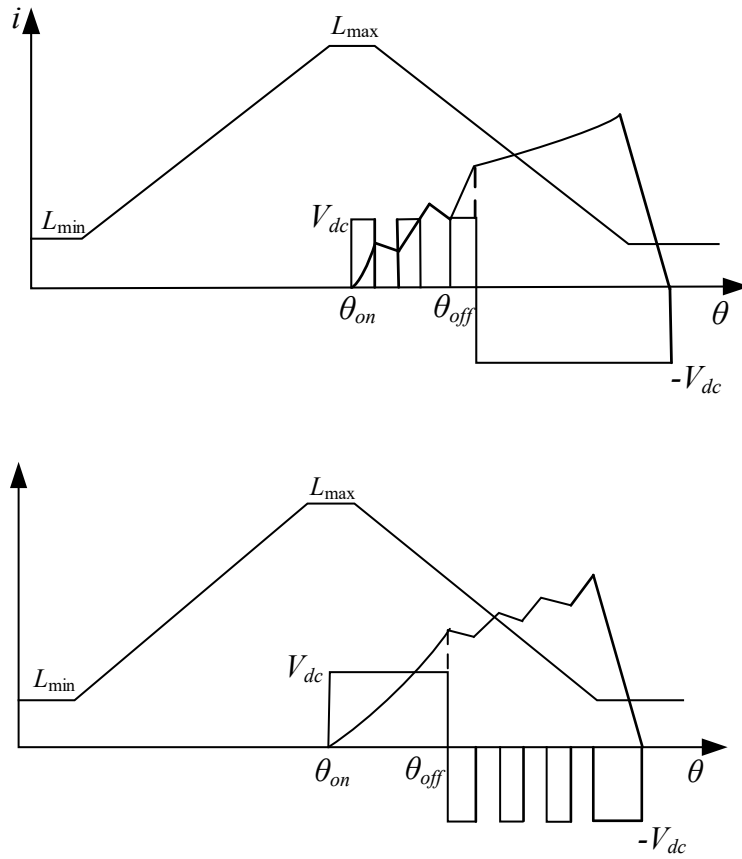


図 2.18 電圧制御(VC)方式の概念図

Fig.2.18. The conceptual diagram of voltage control (VC) method.

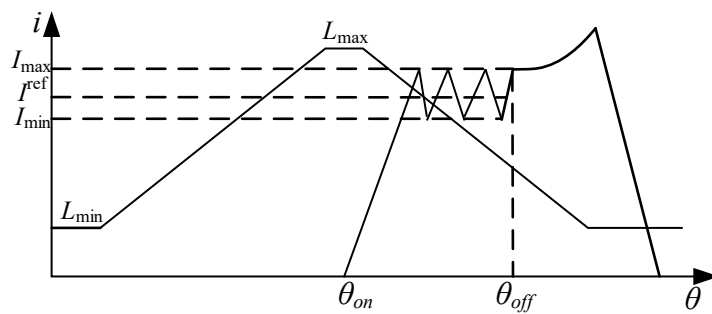


図 2.19 電流チョッピング制御(CCC)方式の概念図

Fig.2.19. The conceptual diagram of current chopping control CCC method.

## 第三章 キャパシタレス AC-AC 変換器

### 3.1 スイッチトリラクタンス発電機の電力変換器

#### 3.1.1 非対称ハーフブリッジインバータ

図 3.1 に非対称ハーフブリッジインバータを示す。非対称ハーフブリッジインバータは、スイッチトリラクタンス発電機 (SRG) の電力変換器として採用されることが多い。各相の回路は IGBT とダイオードで構成されており、IGBT とダイオードはコイルと直列接続されている。

U 相を例として回路動作を説明する。IGBT (S1 と S2) がオンすると、励磁電流が電源+端子から IGBT (S1)、U 相コイル (U)、IGBT (S2)、そして電源-端子に帰還する経路で流れ、U 相コイルに磁気エネルギーが蓄えられる。このときダイオード (D1 と D2) は電源に対して逆接続されているので導通しない。次に IGBT (S1 と S2) がオフすると、U 相コイルに蓄えられた磁気エネルギーにより、U 相コイルに誘起電圧が発生して励磁電流が維持されるが、IGBT (S1 と S2) を経由する電流経路は遮断されているため、電源と逆接続されているダイオード (D1 と D2) を介して励磁電流は電源側に帰還する。IGBT の導通期間は力行モードであり、ダイオードの導通期間は回生モードとなる。SRG は力行モードと回生モードの運転割合により、電動機または発電機として動作が確定する。

非対称ハーフブリッジインバータには、以下の特徴がある。

- (1) 各相に印加される電源電圧は等しい。
- (2) 各相回路が独立しており増設が可能なので、駆動できる SRG の相数に制限がない。

#### 3.1.2 双巻線インバータ

図 3.2 で示すように、双巻線インバータは SRG の各相が鉄心 (コア) を共有することにより、磁氣的に結合している励磁用の一次巻線と消磁用の二次巻線を有している。U 相を例として回路動作を説明する。IGBT (S1) がオンすると、IGBT (S1) と直列に接続されている U 相の一次巻線 (左側コイル) に励磁電流が流れ、一次巻線に磁気エネルギーが蓄えられる。このとき二次巻線 (右側コイル) にはダイオード (D1) に対して逆方向の電圧を誘起するため、ダイオード (D1) は導通しない。次に IGBT (S1) がオフすると、一次巻線と二次巻線に蓄えられた磁気エネルギーにより、一次巻線と二次巻線に誘起電圧が発生する。一次巻線の経路は IGBT (S1) により遮断されるので、蓄えられた磁気エネルギーは二次巻線によって電源側に回生される。

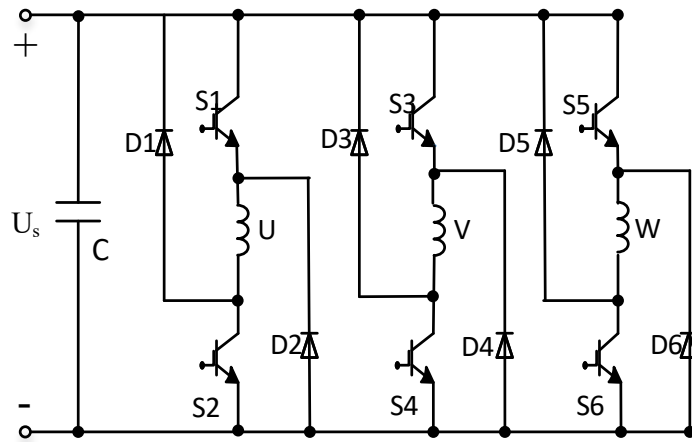


図 3.1 非対称ハーフブリッジインバータ  
Fig.3.1. Asymmetric Half-bridge inverter.

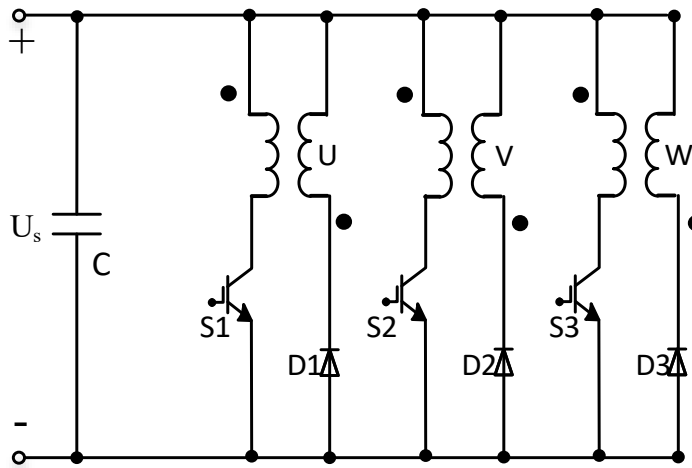


図 3.2 双巻線インバータ  
Fig.3.2. Bifilar Winding inverter.

非対称ハーフブリッジインバータと同様に、IGBTとダイオードの導通期間の割合により、電動機または発電機として動作が確定する。双巻線インバータはIGBTとダイオードの数が半分で済む利点があるが、各素子には電源電圧を超える誘起電圧が印加されることになるので、その耐圧は少なくとも発電機の端子電圧の2倍は必要である。また励磁用と消磁用のコイルを分け、限られたスペースにコイルを配置することになり、コイルの線径を小さくする必要があるのであるため、結果的に巻線抵抗が大きくなり銅損が増加する。

SRGの常用電力変換器に対して、エネルギーバッファとして電解コンデンサは経年変化による性能劣化が発生する可能性があり、寿命がある。使用しており、性能維持と寿命を含むコンディション把握のため、定期的な点検、校正が必要である。コストが高くなる。そこで、電解コンデンサが省略し、SRGに特化したキャパシタレスAC-AC変換器の発想に至った。

## 3.2 キャパシタレス AC-AC 変換器

スイッチトリラクタンス発電機 (SRG) は、回転子突極に近い固定子巻線に電流を印加して磁気回路中に磁気エネルギーが蓄えられた状態において、外部から与える機械力によって固定子突極に吸引されている回転子突極を強制的に離すときに生じる誘起電圧により、蓄えていた磁気エネルギーと外部から供給された機械エネルギーの和を電気エネルギーとして電源側に回生する。

SRGでは各相巻線の励磁を実現するために、3.1で述べたように電力変換器を必要とする。電力変換器の適用においては、発電システムの低価格化と高信頼化を同時に達成することが望まれている。電力変換器は、電源と発電機の間インターフェースの役割を担っている。電力変換器が担うSRGに印加する励磁電圧のオンオフ制御によって、発電動作の初期段階での磁気エネルギーの供給と、蓄えられた磁気エネルギーと外部から供給された機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電動作に相当するエネルギー変換を行っている。理想的な電力変換器の条件は次のとおりである。

- (1) 構成要素（素子数）が少ない。
- (2) 電源電圧の利用率が高い。
- (3) 励磁電流の高速制御が可能である。

### 3.2.1 キャパシタレス AC-AC 変換器の構造

キャパシタレス AC-AC 変換器では双方向スイッチを使用する。一般に用いられるIGBTなどのスイッチング素子は単方向の電流しか導通できないが、双方向スイッチは、双方向の電流を導通できる。ただ双方向の導通機能を単独で実現できるスイッチング素子は存在しないため、従来のスイッチング素子とダイオードの組み合わせにより、双方向の導通機能を

実現している。これまで IGBT とダイオードで構成する双方向スイッチとして図 3.3 で示す 4 方式が提案されている。

図 3.3(a)で示す双方向スイッチは、中央に位置する IGBT と 4 個のダイオードで構成される。この方式はスイッチ素子数が少ないため低コストであるが、導通時に電流は 3 つの素子を通す必要があり、各素子での電力損失や素子自体の消耗が問題となる。このタイプの双方向スイッチは電流の方向を正確に制御できないこともあり適用例が少ない。

図 3.3(b)で示す双方向スイッチは、IGBT のエミッタにダイオードのアノードを接続した回路を逆並列に接続することで構成されている。IGBT のコレクタとダイオードのカソードが入出力端子に接続される。右方向の電流は上側の IGBT により導通し、左方向の電流は下側の IGBT により導通する。導通していない IGBT には逆方向の電圧が印加されることになるが、IGBT は逆電圧に耐えることができないため、逆阻止能力を高めるダイオードを直列接続することにより IGBT の破壊を防いでいる。

図 3.3(c)で示す双方向スイッチの考え方は、基本的に同図(b)の双方向スイッチと同じであり、違いはダイオードが IGBT に接続される位置だけである。同図(c)では、ダイオードのカソードと IGBT のコレクタが接続されている。図 3.3(b)(c)の双方向スイッチは、同図(a)の双方向スイッチと比較して構成する素子数が増えるが、電流方向を制御できるので、電流が導通する素子数が 2 となるため、素子での電力損失を抑えることができる。そこで本論文では、図 3.3(c)の双方向スイッチを用いることを仮定する。

図 3.3(d)で示す双方向スイッチは、ダイオードを内蔵した逆阻止 IGBT を逆並列に接続することで構成されている<sup>(49)</sup>。その双方向スイッチは、機能的には図 3.3(b)(c)の双方向スイッチと同じであるが、外付けのダイオードを使用しないので電力損失が減少し、電力変換器を高効率化することができる。

SRG に適用するキャパシタレス AC-AC 変換器の回路トポロジーを図 3.4 に示す。これまで SRG へのキャパシタレス AC-AC 変換器の適用例はなく、その回路トポロジーはマトリックスコンバータをベースとしているが、各相巻線が独立している SRG に適用できるように工夫されている。キャパシタレス AC-AC 変換器は 18 個の双方向スイッチ、つまり 36 個のダイオードと IGBT で構成される。入力側は三相交流電源  $V_r$ ,  $V_s$ ,  $V_t$  に接続され、出力側は SRG の各相に接続されている。SRG の各相コイルは独立しているため、キャパシタレス AC-AC 変換器を構成する各素子は、励磁巻線の + 端子に接続される側のスイッチ名を  $SP_{ij}$  ( $i=r, s, t; j=u, v, w$ ) で記述し、負端子側に接続される側のスイッチ名を  $SN_{ij}$  ( $i=r, s, t; j=u, v, w$ ) で記述する。

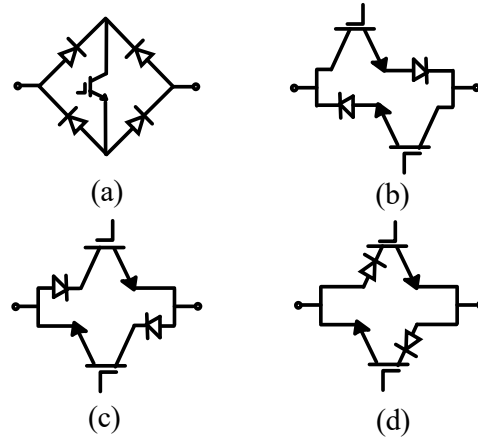


図 3.3 双方向スイッチ  
Fig.3.3. Bidirectional switch.

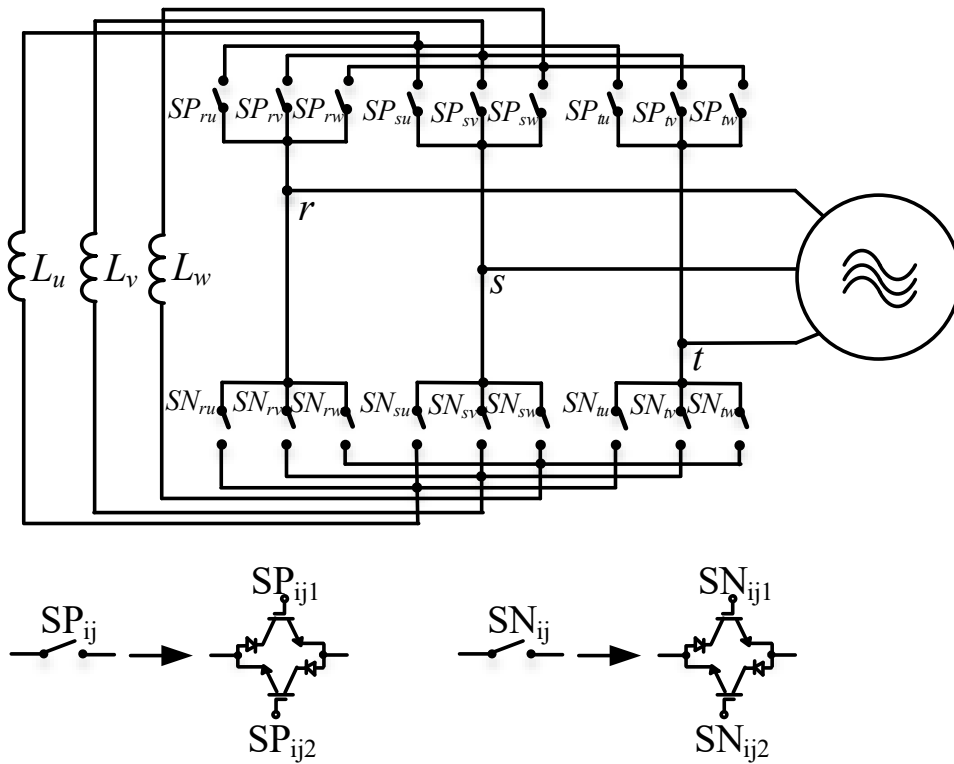


図 3.4 キャパシタレス AC-AC 回路トポロジー  
Fig.3.4. Circuit topology of capacitorless AC-AC.

### 3.2.2 キャパシタレス AC-AC 変換器の動作原理

SRG の各相コイルに印加される電圧は、キャパシタレス AC-AC 変換器の各スイッチのオンオフの状態によって決まる。具体的には、SRG の U 相コイル  $L_u$  に印加される U 相端子電圧  $V_u$  は、三相交流電源の相電圧 ( $V_r, V_s, V_t$ ) と導通するスイッチ ( $SP_{iu}(i=r, s, t), SN_{iu}(i=r, s, t)$ ) の状態によって決まる。

電源側の相電圧 ( $V_r, V_s, V_t$ ) と線間電圧 ( $V_{rs}, V_{st}, V_{tr}$ ) は、相電圧の振幅を  $E$  とし、電源周波数  $\omega$  として、式(3.1), (3.2), (3.3)で定義する。

$$\begin{bmatrix} V_r \\ V_s \\ V_t \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{rs} \\ V_{st} \\ V_{tr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r - V_s \\ V_s - V_t \\ V_t - V_r \end{bmatrix} = \sqrt{3}E \begin{bmatrix} \cos(\theta + \pi/6) \\ \cos(\theta - \pi/2) \\ \cos(\theta + 5\pi/6) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\theta = \omega t \quad (3.3)$$

電源側の相電圧を入力電圧として、キャパシタレス AC-AC 変換器の各スイッチをオンオフ制御することによって、SRG の各相コイルに対して任意の励磁電圧を印加することができる。ここで、キャパシタレス AC-AC 変換器のスイッチの状態を表す行列  $T$  を次式で定義する。

$$T = \begin{bmatrix} SP_{rj} & SP_{sj} & SP_{tj} \\ -SN_{rj} & -SN_{sj} & -SN_{tj} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

行列  $T$  の要素であるスイッチング関数 ( $SP_{ij} / SN_{ij}$ ) を次式で定義する。

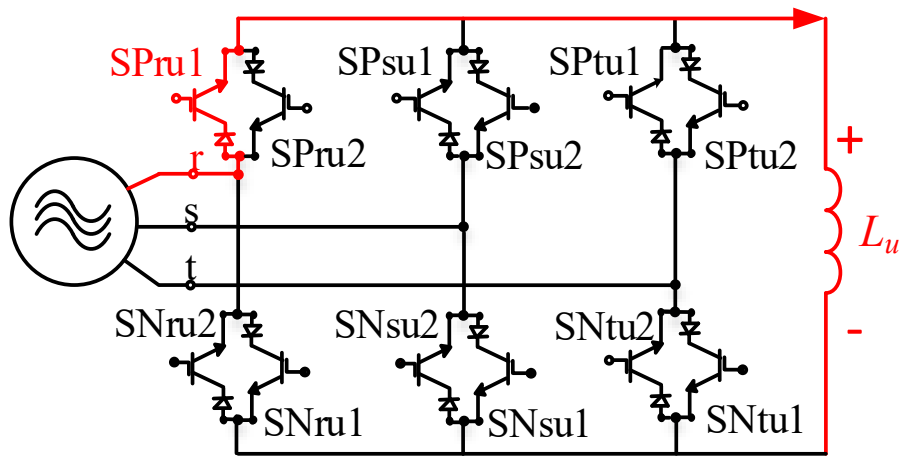
$$SP_{ij} / SN_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{on} \\ 0 & \text{off} \end{cases} \quad (i = r, s, t; j = u, v, w) \quad (3.5)$$

各コイルに印加する励磁電圧は、行列  $T$  と相電圧 ( $V_r, V_s, V_t$ ) との積となる。

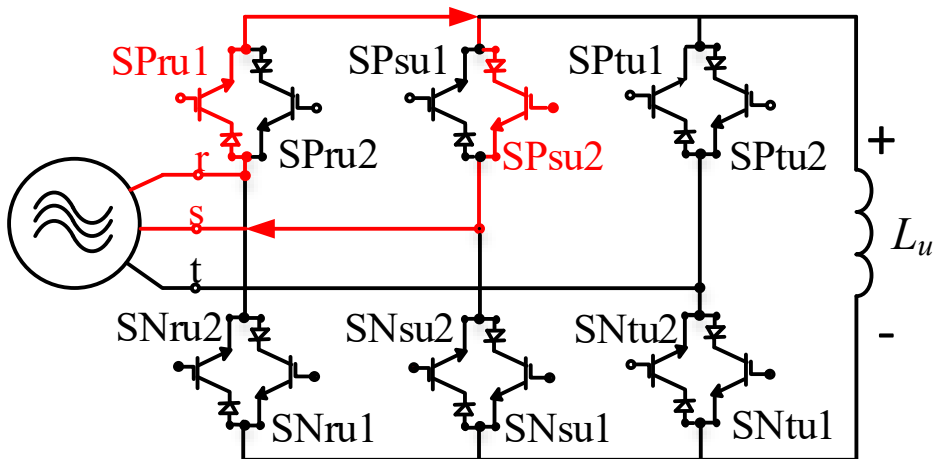
$$v_j = \begin{bmatrix} SP_{rj} & SP_{sj} & SP_{tj} \\ -SN_{rj} & -SN_{sj} & -SN_{tj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \\ v_t \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

行列  $T$  の各要素を制御することにより結果的に各相コイルの励磁電圧を制御することができる。その制御において、スイッチング素子の破損に繋がるスイッチング動作を図 3.5 に





(a) current pathway blockade



(b) power short circuit

図 3.5 キャパシタレス AC-AC 変換器の禁止事項  
 Fig.3.5. Prohibited matter of capacitorless AC-AC converter.

示す。同図(a)では、電流が存在しているのに全スイッチをオフすることで電流経路が遮断され、スイッチング素子に高電圧が印加される状態を示している。同図(b)では、SRGのU相コイルにr相とs相の電源電圧が同時に接続され、電源短絡が生じている状態を示している。このような状態はスイッチング素子の破壊に繋がるので、行列Tにおけるスイッチング関数(0 or 1)は、電流経路遮断や電源短絡が生じないように決定する必要がある。

### 3.3 転流方式

キャパシタレス AC-AC 変換器における転流は、文献(50)で提案されているマトリックスコンバータで採用されている4ステップ転流方式により行う。4ステップ転流方式は、転流するためのステップ数が多いが、電流と電圧の状態をモニターしながら確実に転流を行うため信頼性が高い。

#### 3.3.1 マトリックスコンバータの転流方式

マトリックスコンバータの4ステップ転流方式はN. Buranyによって提案され、現在でも広く使用されている<sup>(61)</sup>。4ステップ転流方式の動作を説明するために、マトリックスコンバータにおける回路の一部を図3.6に示す。簡単のため入力電圧は交流電圧源( $U_r$ ,  $U_s$ )を仮定する。また双方向スイッチはIGBTとダイオードで構成される単方向スイッチを逆並列に接続した方式とし、出力側のコイルLに対して4個のスイッチング素子が接続されていると仮定し、r相からs相への転流について説明する。

表3.1にマトリックスコンバータが安全に動作するスイッチング関数の導通モードを示す。上の双方向スイッチが導通している状態(スイッチングモード1)から下の双方向スイッチが導通している状態(スイッチングモード2)への転流を例として説明する。初期状態において、電流はコイルLの方向(+方向)へ流れているとする。この場合は、スイッチングモード1からスイッチングモード3, 7, 5を経由し、スイッチングモード2に切り替える。このスイッチング動作は図3.7(a)に相当する。逆に初期状態において、電流が一方方向に流れている場合は、スイッチングモード1からスイッチングモード4, 8, 6を経由し、スイッチングモード2に切り替える。このスイッチング動作は図3.7(b)に相当する。

#### 3.3.2 キャパシタレス AC-AC 変換器の転流方式

図3.8にキャパシタレス AC-AC 変換器のU相回路を示す。ここで、図の添え字P, Nは電流の方向に対応しており、図3.8で示すように添字NはSRGの巻線+端子から-端子への電流方向を示し、添字PはSRGの巻線-端子から+端子への電流方向を示す。また、双方向スイッチは左右両方ともオンにすることで、双方向の電流が通電可能となる。相間を跨

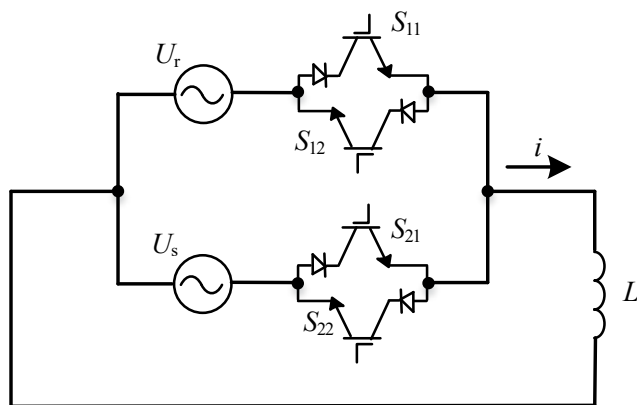


図 3.6 マトリックスコンバータ回路  
Fig.3.6. Circuit of matrix converter.

表 3.1 双方向スイッチングの導通モード  
Table 3.1. Switching mode of bidirectional switch.

Switching mode	U						
	$SP_{ru}$	$SP_{su}$	$SP_{tu}$	$SN_{ru}$	$SN_{su}$	$SN_{tu}$	$V_u$
1	1	0	0	1	0	0	0
2	1	0	0	0	1	0	$V_{rs}$
3	1	0	0	0	0	1	$V_{rt}$
4	0	1	0	1	0	0	$V_{sr}$
5	0	1	0	0	1	0	0
6	0	1	0	0	0	1	$V_{st}$
7	0	0	1	1	0	0	$V_{tr}$
8	0	0	1	0	1	0	$V_{ts}$
9	0	0	1	0	0	1	0

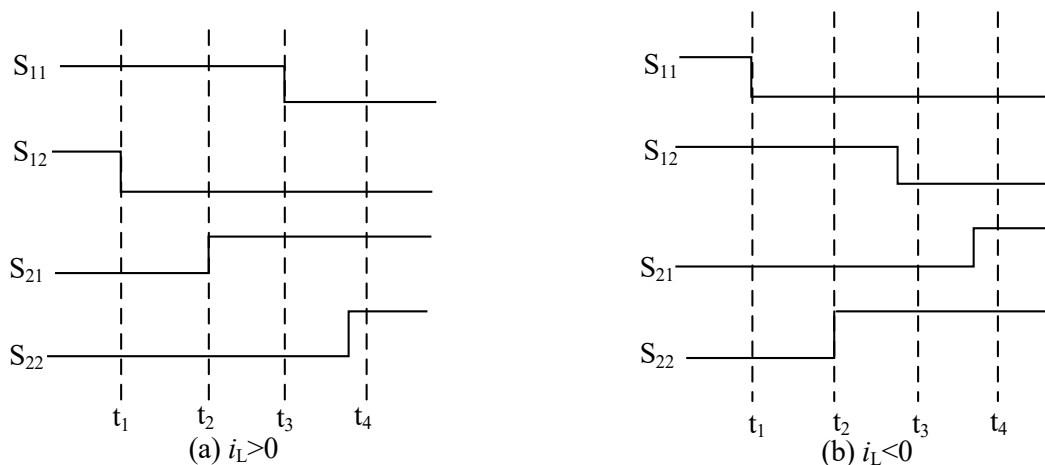


図 3.7 4ステップ転流方式  
Fig. 3.7. 4-step commutation method.

ぐ転流において、電流経路遮断と電源短絡を防ぐ転流方式について説明する。

#### (1) 電流経路遮断の防止

図 3.9 に電流経路遮断を防止する転流方式を示す。同図(a)は、電流が N 方向に流れている初期状態において、 $r$  相から  $s$  相への転流を示している。 $r$  相のスイッチ SPru2 がオフしている状態で、SPru1 がオフする前に SPsu1 をオンすることで、電流径路を確保できるため電流の連続性を保つことができる。同図(b)は、電流が P 方向に流れている初期状態において、 $r$  相から  $s$  相への転流を示している。 $s$  相のスイッチ SNsu1 がオフする前に  $r$  相のスイッチ SNru1 をオンすることで、電流経路の遮断を防止できる。

#### (2) 電源短絡

図 3.5(b)は電源短絡状態を示している。電流が N 方向に流れている状態において、 $r$  相から  $s$  相に転流するときに、図 3.5(b)で示すように SPru1 と SPsu2 が同時にオン状態となると、 $r$  相の電圧が  $s$  相より大きい場合は大電流がスイッチ SPru1 から SPsu2 に流れ、電源短絡が発生する。このような電源短絡を防止するために、双方向スイッチを図 3.10 で示す転流方式を用いて制御することにより、電源短絡を防止する必要がある。

図 3.10 (a)は、コイル+端子側の双方向スイッチの  $r$  相から  $s$  相への転流時における、スイッチ SPru1 とスイッチ SPsu2 の電源短絡を防止する転流方式を示している。SPru1 のオフと同時に SPsu2 をオンせず、一定の期間だけ両方のスイッチがオフする期間を設けることにより、電源短絡が発生しない。

図 3.10 (b)は、コイル-端子側の双方向スイッチの  $r$  相から  $s$  相への転流時における、スイッチ SNru1 とスイッチ SNsu2 の電源短絡を防止する転流方式を示している。SNru1 のオフと同時にスイッチ SNsu2 をオンしないことにより、電源短絡が発生しない。

キャパシタレス AC-AC 変換器には、各相に対して 9 通りのスイッチングモードが存在する。そのスイッチングモードを表 3.2 に示す。またキャパシタレス AC-AC 変換器の転流には、マトリックスコンバータにも適用されている 4 ステップ転流方式を採用する。4 ステップ転流方式は、検出する電源側の線間電圧の大小関係及び線電流の方向を判別した上で、電源短絡や電流経路遮断が生じないように 4 ステップにより転流を行う方式である。

図 3.11 で示すように、線間電圧の最大となる相を励磁時に使用し、線間電圧が最小となる相を発電時に使用する励磁方法を検討する。SRG に対して、キャパシタレス AC-AC 変換器を用いる力行と回生の励磁方法は次章で説明する。

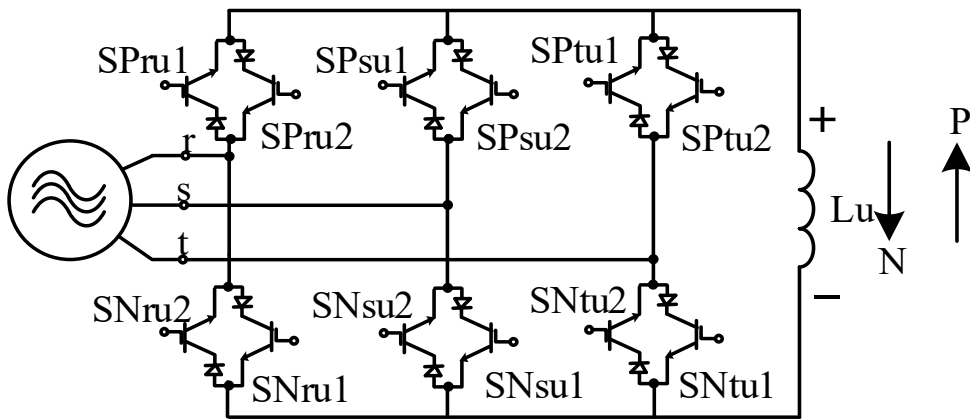


図 3.8 一相分の回路

Fig. 3.8. Circuit topology of U phase.

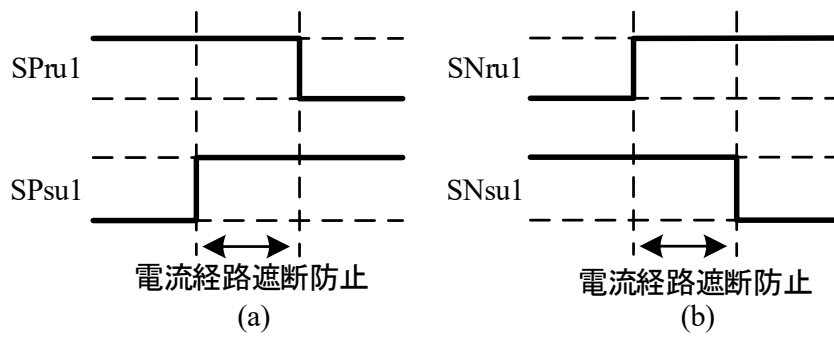


図 3.9 電流経路遮断防止の転流方式

Fig. 3.9. Commutation method of prevent current pathway blockade.

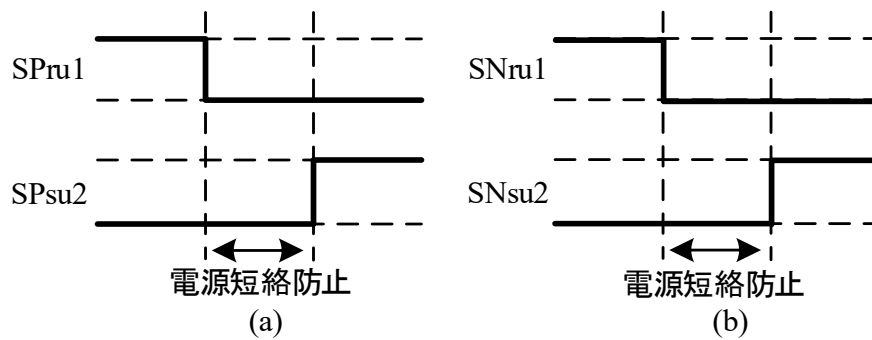


図 3.10 電源短絡防止の転流方式

Fig. 3.10. Commutation method of prevent power short circuit.

表 3.2 スイッチングモード

Table 3.2. Switching mode.

Switching mode	U						
	$SP_{ru}$	$SP_{su}$	$SP_{tu}$	$SN_{ru}$	$SN_{su}$	$SN_{tu}$	$V_u$
1	1	0	0	1	0	0	0
2	1	0	0	0	1	0	$V_{rs}$
3	1	0	0	0	0	1	$V_{rt}$
4	0	1	0	1	0	0	$V_{sr}$
5	0	1	0	0	1	0	0
6	0	1	0	0	0	1	$V_{st}$
7	0	0	1	1	0	0	$V_{tr}$
8	0	0	1	0	1	0	$V_{ts}$
9	0	0	1	0	0	1	0

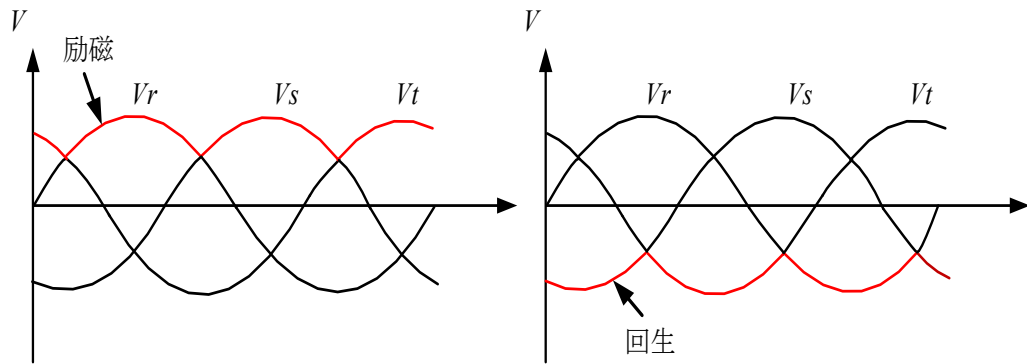


図 3.11 相電圧

Fig. 3.11. Phase voltages.

## 第四章 可変速風力発電システム

### 4.1 SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器による

#### 可変速風力発電システム

図 4.1 にキャパシタレス AC-AC 変換器とスイッチトリラクタンス発電機 (SRG) による可変速風力発電システム (VSWPGS), 提案方式を示す。提案方式は, 風車タービン (WT), 増速機, 位置センサ付き SRG, キャパシタレス AC-AC 変換器 (双方向スイッチ 18 個), コントローラで構成されている。

WT は増速機を介さずに SRG と直結しており, ギヤ騒音や機械損失を最小限に留める構成となっている。SRG は, 系統の線間電圧により固定子コイルが直接励磁され, 転流後に固定子コイルにて発生する誘起電圧により, 系統側に発電電力を供給する。一時的に系統側から電力を受け取るが, それ以上の電力を系統に戻すことで発電を行う。励磁区間の制御は, 回転軸端のロータリエンコーダ (RE) から得られる位置情報に基づいて正確に行われる。同じく RE から得られる回転速度  $\omega_r$  をフィードバック量として, 可変速風力発電に必要な速度制御系を構築している。

### 4.2 風車タービン

#### 4.2.1 風車タービンの種類

風力発電システムは, 大気の流れによって形成される風により WT を稼働させて機械的エネルギーを生成するとともに, 発電機は風力エネルギーから変換された機械エネルギーを電気エネルギーに変換する。したがって, 一般的な風力発電システムには WT と発電機の 2 つの主要部分が含まれ, 前者は風力エネルギーを機械エネルギーに変換し, 後者は機械エネルギーを電気エネルギーに変換する。図 4.2 で示すように実際の構成では, ブレード, ナセル, ブレーキ装置, タワー, 基礎, 制御システム, 運行監視装置, 補助ケーブルなどの補助コンポーネントがある<sup>(52)</sup>。

WT において風を受ける風車は構造と機能に応じて様々な種類に分けることができる。一般に, 風車は回転軸方向によって水平軸風車と垂直軸風車に分けられる<sup>(52)</sup>。また, 動作原理から揚力形と抗力形がある。図 4.3 に風車の形式を示す。

水平軸風車はプロペラ式, セイルウィング式, オランダ式, 多翼式を含んでいる。動作時

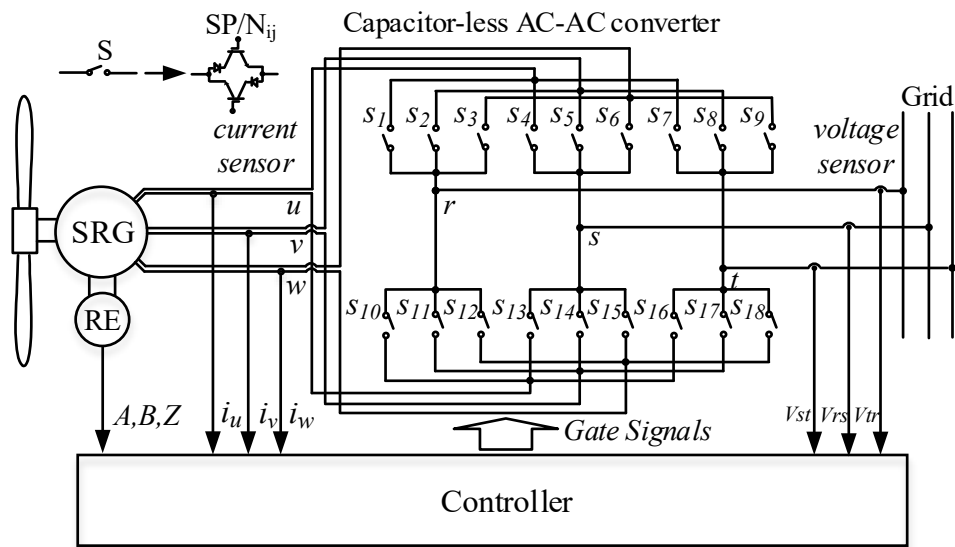


図 4.1 キャパシタレス AC-AC 変換器を用いた SRG 風力発電システム  
 Fig.4.1. SRG wind power system using capacitor-less AC-AC converter.

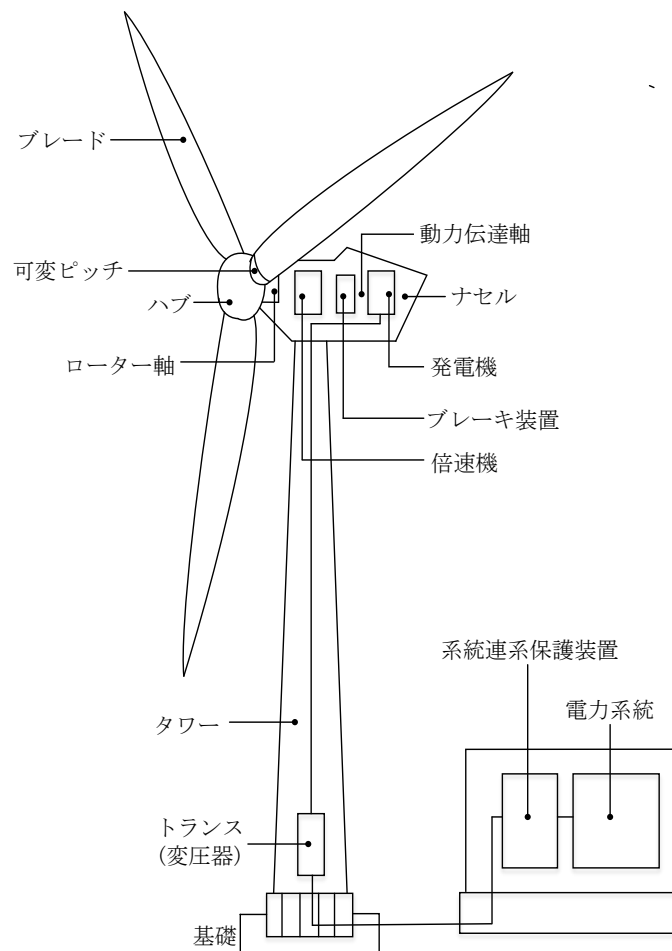


図 4.2 風力発電システムの構成  
 Fig.4.2. The structure of wind power system.



水平軸風車のブレードは水平軸を中心に回転し、ブレードの回転面は風向に垂直になる。現在、風力発電に多用される高回転タイプの WT はプロペラ式風車である。プロペラ式風車は高速回転時の風エネルギー利用係数が大きく、風エネルギーをより効率的に利用できる。高回転仕様のプロペラ式風車のブレード数は 1~4 だが、一般的に価格性能面のバランスが優れているブレード数 3 のプロペラ式風車が圧倒的に多く使われている。

垂直軸風車には、ダリウス式、直線翼式、サボニウス式、パドル式の風車がある。垂直軸風車のブレードは垂直軸を中心に回転し、あらゆる方向の風を受け入れることができるため、風向変化に対応するための位置制御装置を必要としない。

#### 4.2.2 風車タービンの理論と特性曲線

上述の通り、風車は風の力を利用して機械力を得る装置である。したがって、風車が風エネルギーを機械エネルギーに変換できる効率上限は、ベッツの理論に基づいて理想的な風車に対して明らかにされている。最初に風車は円盤であると仮定するとともに、風車を通過する気流抗力を無視し、風車表面全体を通る気流は均一であると仮定する。また、空気の流れの方向は風車の回転軸に沿って風車の前後を通る仮定する。

図 4.4 に風力エネルギーの吸収円盤を示す。ここで、 $S$  は風車の断面積、 $v$  は風車を通過する風の風速、 $S_1$  は上流面の断面積、 $v_1$  は上流面の風速、 $S_2$  は下流面の断面積、 $v_2$  は下流面の風速である。風車を通過する前後の風力エネルギーの変化量  $\Delta E$  は、次式で表わされる。

$$\Delta E = \frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (4.1)$$

式(4.1)中、風車の受風面を通過する空気質量  $m$  は  $\rho S v$  である。風車が単位時間あたりのエネルギーは次式を用いて得られる。

$$P = Fv \quad (4.2)$$

運動量定理から、風力エネルギーが風車に及ぼす力は次式で表わされる。

$$F = \rho S v (v_1 - v_2) \quad (4.3)$$

式(4.3)を式(4.2)に代入し、次式で得る。

$$P = Fv = \rho S v^2 (v_1 - v_2) \quad (4.4)$$

理想状態を考えて、 $P = \Delta E$  であるため、したがって、

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (4.5)$$

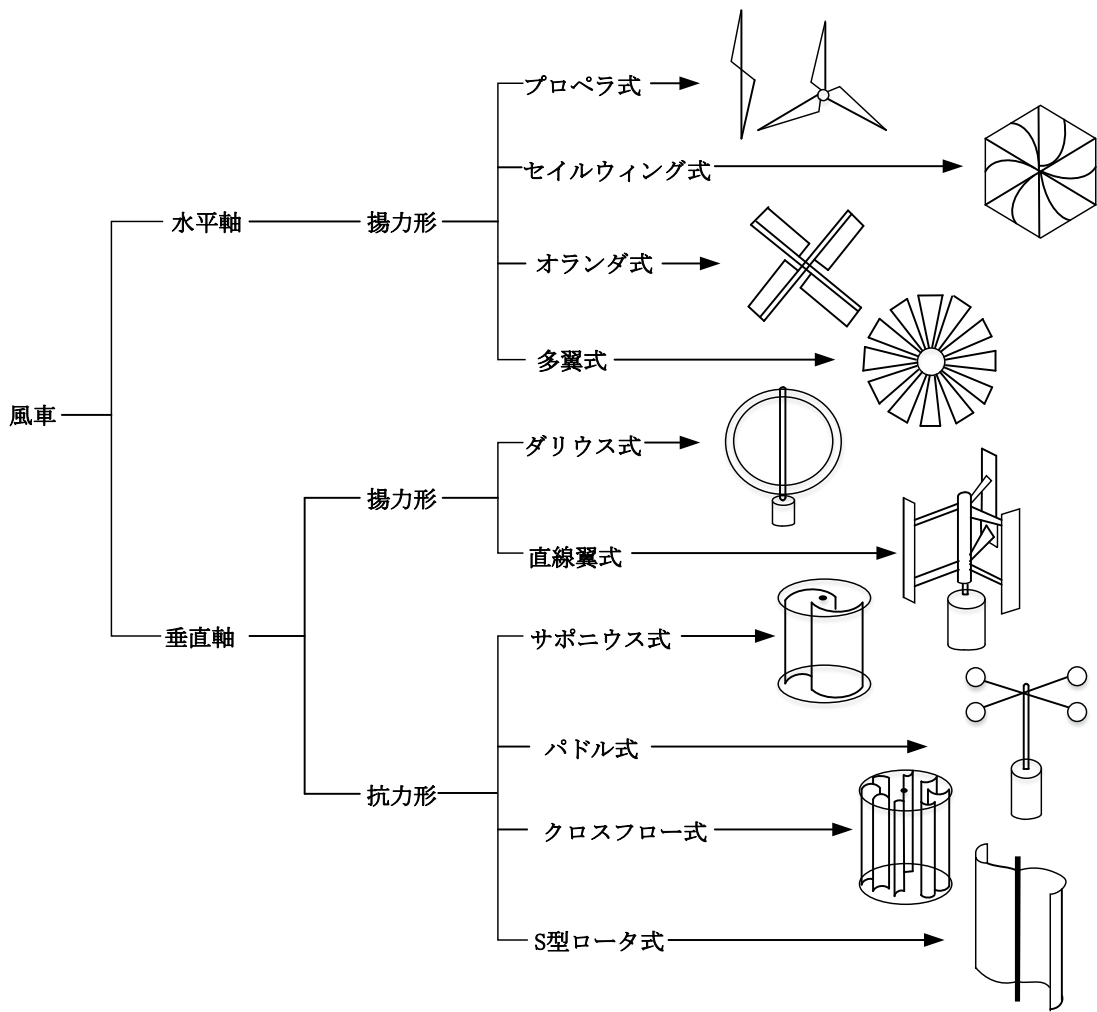


図 4.3 風車の形式  
Fig.4.3. Windmill format.

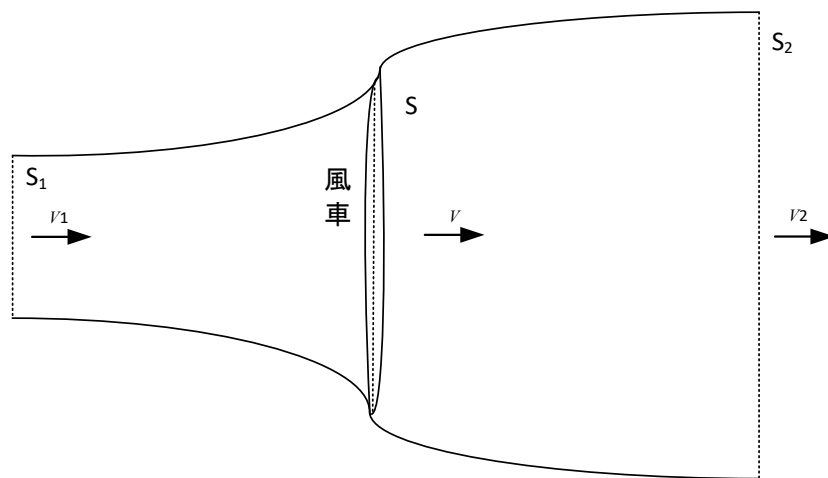


図 4.4 風力エネルギー吸収円盤  
Fig.4.4. Wind energy absorption disk.

である。式(4.4)を式(4.3), 式(4.5)に代入し,  $P$  は次式で表わされる。

$$F = \frac{1}{2} \rho S (v_1^2 - v_2^2) \quad (4.6)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (4.7)$$

風車を通過する風の方のエネルギーは, 式(4.8)で与えられる。

$$P' = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (4.8)$$

さらに, 風車の出力係数は次式で定義される。

$$C_p = \frac{P}{P'} \quad (4.9)$$

式(4.7),(4.8)を式(4.4)に代入し, 風車の出力係数は次式で表わされる。

$$C_p = \frac{1}{2} \times \left[ 1 + \frac{v_2}{v_1} - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right] \quad (4.10)$$

$C_p$  は  $v_2/v_1$  の三次関数である。出力係数の最大値を得るため, 式(4.10)の導関数が 0 となる値を求め。

$$C_p' = \frac{1}{2} \times \left[ 1 - 2 \times \frac{v_2}{v_1} - 3 \times \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

よって,  $v_2/v_1 = -1$ ,  $v_2/v_1 = 1/3$  となる。 $v_1, v_2$  は正数であるため,  $v_2/v_1 = -1$  は当てはまらない。そこで,  $v_2/v_1 = 1/3$  を採用すると, 最大出力係数  $C_{pmax}$  が得る。

$$C_{pmax} = \frac{1}{2} \times \left[ 1 + \frac{1}{3} - \left( \frac{1}{3} \right)^2 - \left( \frac{1}{3} \right)^3 \right] = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (4.12)$$

式(4.12)による, 風車の最大効率は約 59.3%となる。これは理想状態でベッツ限界という。したがって, 風車が風エネルギーを取り込む能力は風力発電システム全体の有効電力に決定的な役割を果たすだけでなく, WT が安全かつ安定して動作できるかどうかにも直接影響する。 $C_p$  はブレードのピッチ角  $\beta$  と周速比  $\lambda$  の関数で, 次式で定義される。

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (4.13)$$

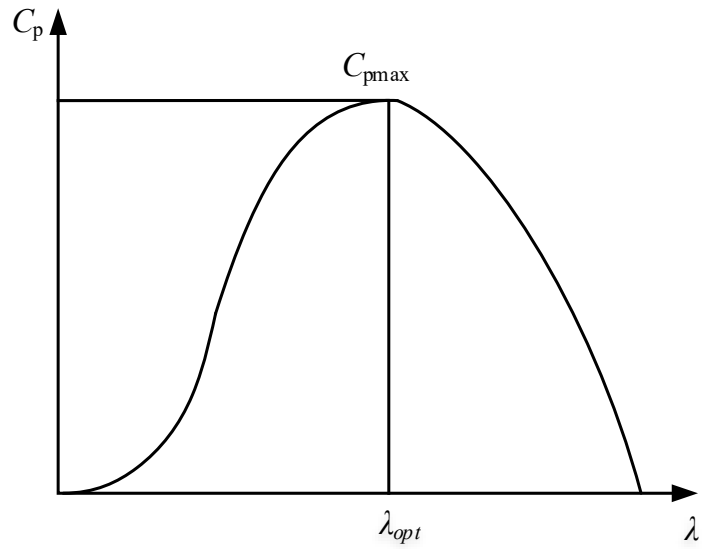


図 4.5 周速比と風車出力係数の関係曲線

Fig.4.5. The curve between tip speed ratio and wind turbine power coefficient.

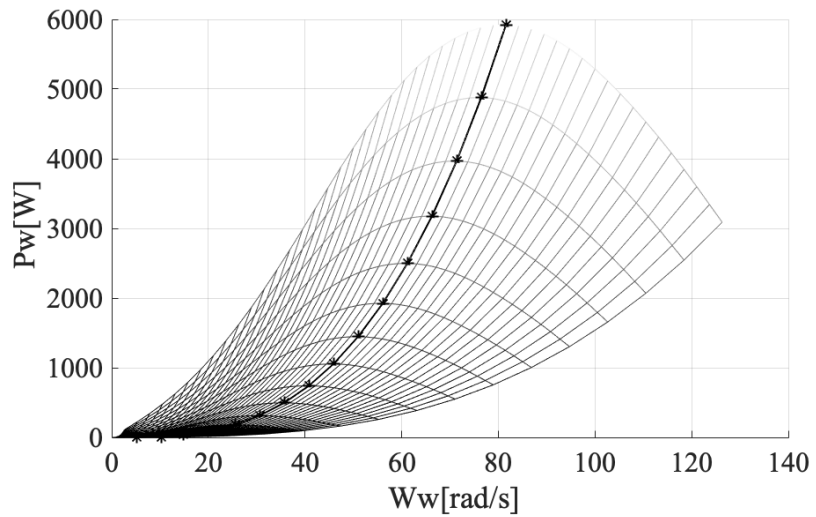


図 4.6 風車の出力特性曲線

Fig.4.6. The output characteristic curve of Windmill.

ここで、 $\lambda = \omega R / v$ ,  $R$  はブレードの半径、 $v$  は風速、 $\omega$  は風車の回転速度である。 $\beta$  が固定値の場合に図 4.5 に示すように風車の  $C_p(\lambda, \beta)$  は固定関数の曲線になる。

図 4.5 で示すように、風車に対して、 $\beta$  が変化しない条件下では、唯一の最適な周速比  $\lambda_{opt}$  があるため、 $C_p$  が最大値  $C_{pmax}$  に達する。このとき、風力タービンの風力エネルギー変換効率が高くなる。また、周速比の式  $\lambda = \omega R / v$  によって、一定風速の場合に風車は特定の速度で運行した場合のみに最大の風エネルギー変換効率を得ることができる。

図 4.6 に風速を変化させた時 ( $v_1 > v_2 > v_3$ ) の、風車の出力特性曲線を示す。各風速は一つのパワーカーブに対応するとともに、各パワーカーブには風車の出力最大値  $P_{max}$  になる唯一の回転速度  $\omega$  がある。異なる風速での風力タービンの最大出力を接続すると、得られた曲線が風力タービンの最適な出力曲線になる。風車が最適な出力曲線で動作しているとき、風エネルギー変換効率が最も高くなる。そして、風速が変化する場合、風車の最適な風エネルギー変換効率を維持するために、風速の変化に合わせて回転速度  $\omega$  を適時に調整し、風車が最適な出力曲線で動作するように、周速比  $\lambda$  が常に最適な周速比  $\lambda_{opt}$  に維持される必要がある。

### 4.2.3 翼素理論

翼素運動理論に基づいて、風車出力やトルクを導出される。図 4.7 に速度三角形を示す。図において、変数の定義は以下のとおりである。

$\omega$ : ロータ回転速度,  $W$ : ブレード流入風速,  $\beta$ : ブレードピッチ角

$\alpha$ : 迎え角,  $\phi$ : 流入角,  $L$ : 揚力,  $D$ : 抗力,  $a, a'$ : 干渉係数,  $l$ : コード幅

風車半径  $r$  の位置における微小幅  $dr$  の翼素で発生する揚力  $dL$  と抗力  $dD$  は、空気密度を  $\rho$ , 揚力係数  $C_l$  と抗力係数  $C_d$  を用いて、次式で与えられる。

$$dL = \frac{1}{2} \rho C_l l W^2 dr \quad (4.14)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho C_d l W^2 dr \quad (4.15)$$

従って、風車半径  $r$  の位置における微小幅  $dr$  の翼素で発生するトルク  $dT$  は、揚力  $dL$  と抗力  $dD$  の回転方向成分の和と半径  $r$  の積で表す。

$$dT = r(dL \sin \phi - dD \cos \phi) \quad (4.16)$$

また、翼枚数  $B$  を考慮して、トルク  $dT$  は次式で与えられる。

$$dT = \frac{1}{2} \rho W^2 r (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) Bldr \quad (4.17)$$

さらに，出力  $dP$  はトルク  $dT$  と回転角速度  $\omega$  の積で表す。

$$dP = \omega dT = \frac{1}{2} \rho W^2 \omega r (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) Bldr \quad (4.18)$$

また，推力  $dQ$  は次式で計算される。

$$dQ = \frac{1}{2} \rho W^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) Bldr \quad (4.19)$$

風車に対し，ブレード流入風速  $W$ ，流入角  $\phi$  は次式で計算される<sup>(53)</sup>。

$$W = \sqrt{\{v_1(1-a)\}^2 + \{\omega r(1+a')\}^2} \quad (4.20)$$

$$\tan \phi = \frac{v_1(1-a)}{\omega r(1+a')} \quad (4.21)$$

#### 4.2.4 翼素運動理論

運動量保存則やベルヌーイの法則による， $r$  から  $r+dr$  までの円環部で発生するトルク  $dT$  と推力  $dQ$  は次式で与えられる。

$$dT = \rho v (2\pi r dr) 2wr \quad (4.22)$$

$$dQ = \rho u (2\pi r dr) 2(v_1 - v) \quad (4.23)$$

式(4.17)と式(4.22)，式(4.19)と式(4.23)を等しいとおき，次式で導出られる。

$$\frac{v_1 - v}{v} = \left( \frac{Bl}{8\pi r} \right) \left( \frac{C_l \cos \phi + C_d \sin \phi}{\sin^2 \phi} \right) \quad (4.24)$$

$$\frac{w}{w + \omega r} = \left( \frac{Bl}{8\pi r} \right) \left( \frac{C_l \sin \phi - C_d \cos \phi}{\sin \phi \cos \phi} \right) \quad (4.25)$$

ここで， $w$  は周速， $a=(v_1-v)/v$ ， $a'=w/\omega r$ ， $\sigma=Bl/2\pi r$ (半径  $r$  の円環部の受風面積とその部分のブレードの面積の比率)である。次式で得られる。

$$\frac{a}{1-a} = \frac{C_l \cos \phi + C_d \sin \phi}{4 \sin^2 \phi} \sigma \quad (4.26)$$

$$\frac{a'}{1-a'} = \frac{C_l \sin \phi - C_d \cos \phi}{4 \sin \phi \cos \phi} \sigma \quad (4.27)$$

周速比の式  $\lambda = \omega R/v_1$  を式(4.21)に代入し、次式を得る。

$$\lambda \tan \phi = \frac{1-a}{1+a'} \quad (4.28)$$

以上の各式に基づいて、風車タービンローカルな出力係数  $C_p$ 、ローカルなトルク係数  $C_T$ 、ローカルな推力係数  $C_Q$  は次式で計算できる。

$$C_p = \frac{\omega dT}{0.5 \rho v_1^3 (2\pi r dr)} = \frac{\omega \rho v (2\pi r dr) 2wr}{0.5 \rho v_1^3 (2\pi r dr)} = 4a'(1-a)\lambda^2 \quad (4.29)$$

$$C_T = \frac{dT}{0.5 \rho v_1^2 (2\pi r dr) r} = \frac{\rho v (2\pi r dr) 2wr}{0.5 \rho v_1^3 (2\pi r dr) r} = 4a'(1-a)\lambda \quad (4.30)$$

$$C_Q = \frac{dQ}{0.5 \rho v_1^2 (2\pi r dr)} = \frac{\rho v (2\pi r dr) 2(v_1 - v)}{0.5 \rho v_1^3 (2\pi r dr)} = 4a(1-a) \quad (4.31)$$

ローカルな出力係数、ローカルなトルク係数、ローカルな推力係数を用いて、風車の出力  $P$ 、トルク  $T$ 、推力  $Q$  は次式で与えられる。

$$P = 0.5 \rho v_1^3 \int_0^R C_p 2\pi r dr \quad (4.32)$$

$$T = 0.5 \rho v_1^2 \int_0^R C_T 2\pi r^2 dr \quad (4.33)$$

$$Q = 0.5 \rho v_1^2 \int_0^R C_Q 2\pi r dr \quad (4.34)$$

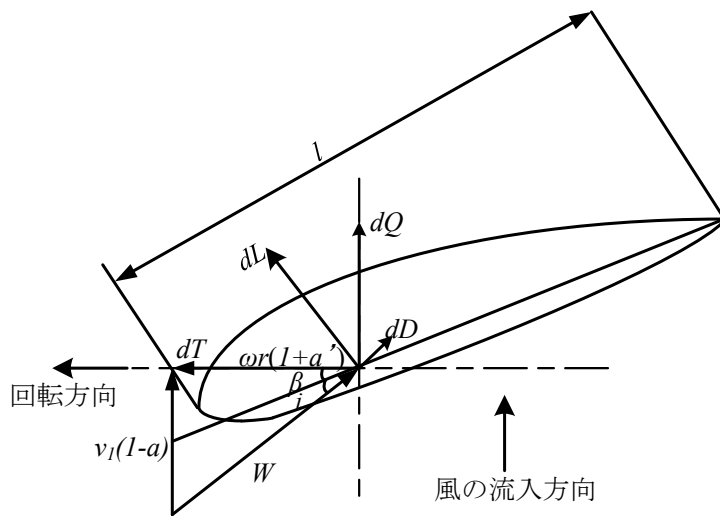


図 4.7 速度三角形  
Fig.4.7. Velocity diagram.

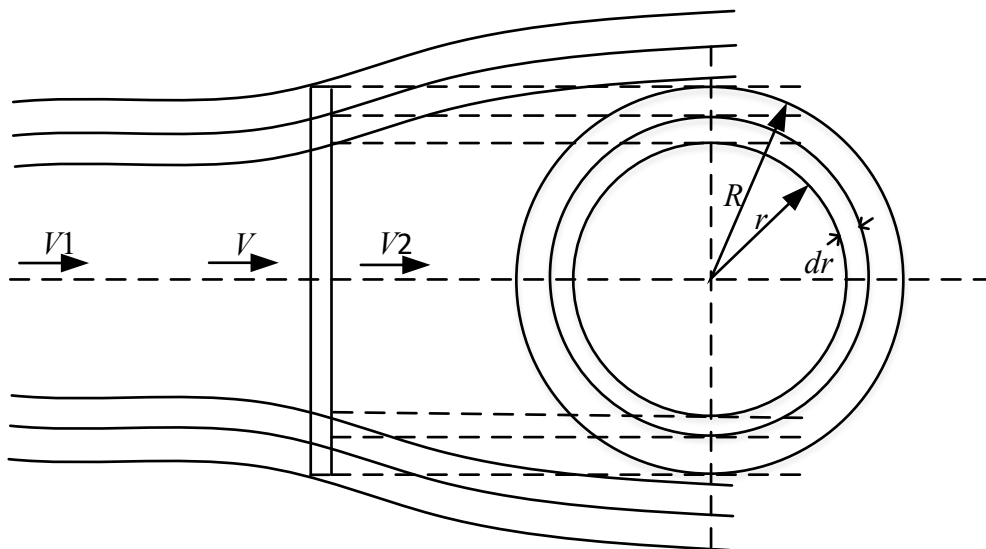


図 4.8 環状流管  
Fig.4.8. Annular flow tube.



### 4.3 可変速風力発電システムのシミュレーション

図 4.9 にキャパシタレス AC-AC 変換器と SRG による可変速制御システムのシミュレーションモデルを示す。シミュレーションモデルは、SRG、キャパシタレス AC-AC 変換器、機械系、コントローラの各モデルで構成される。SRG で生じる鉄損やキャパシタレス AC-AC 変換器におけるスイッチング損失は考慮していない。Matlab/Simulink において、各モデルをモデリングし、速度指令や負荷などの条件に対して、システム全体の挙動を明らかにするためにシミュレーションを行う。本節では VSWPGS を構成する部分についてそれぞれを説明する。

#### 4.3.1 Matlab/Simulink の紹介

科学研究において、複雑な数学の計算を克服するために、1967 年に米国会社 Math Works は Matrix Laboratory ソフトウェアパッケージを開発した。不断の更新と拡張の後、1984 年に Matlab の公式バージョンを提出し、1992 年に画期的な Matlab 4.0 のバージョンを発売した。また 1993 年にコンピューター版を発表し、ますます広く使用されるようになっていく。目下、科学計算およびシステムシミュレーションに最適なソフトウェアツールになる。

Matlab は数学的な計算、結果の視覚化、プログラミングを統合し、科学的な計算とエンジニアリング計算を簡単に操作できる数学的なソフトウェアである。現在、世界で最も広く使用されているエンジニアリング計算ソフトウェアの一つになっている。Matlab は、何年にもわたる開発と改善の末に多分野、多機能のテクノロジーアプリケーションソフトウェアになった。以下の特徴がある：

- (1) 超数値計算機能：Matlab の環境では、豊富な数学、統計、科学、工学関数を利用できる。
- (2) データ視覚化機能：Matlab のグラフィックス機能により、ユーザーはビジュアルデータを分析できる。
- (3) 豊富なツールボックス：Matlab には、さまざまなプログラムツールボックスが含まれている。

Simulink は、1990 年頃に Math Works 社によって提案された製品である。それは Matlab でシステムブロック図とシミュレーションを構築するための環境である。Simulink は微分方程式を解くだけでなく、制御システムシミュレーションに使用できるさまざまなモジュールも提供されている。さらに、エンジニアリングアプリケーションで使用できるモジュールも提供し、例えばモーターシステム、メカニズムシステム、通信システムなどのモジュールは、デリングやシミュレーションの研究に直接使用できる。Simulink は強力な機能があり、複雑なシステムを分析できる。

Simulink には、モジュールライブラリ、モジュール構造、命令解析およびデモプログラム

で構成され、モデル化および動的なシステムシミュレーション環境である。近年、Simulink は Matlab の機能をもっと拡張させているため、システムシミュレーションの研究が非常に便利になり、直感的になった。

#### 4.3.2 風速

風は風車のエネルギー源である。さまざまな風の条件下で発電システムのシミュレーションを行うために、風速モデルを確立する必要がある。一般的に風速モデルには主に次のような状況がある。図 4.10 に風速モデル例を示す。

- (1) 基本風：基本風は風速モデルで大きな割合を占めており、ウィンドファームの平均風速の変化を反映して、風車の通常の操作中に常に存在している。一般的に、風速は時間とともに変化がないと考えられる。Simulink で Constant モジュールの代わりに使用される。
- (2) 変速風：変速風は、ある平均風速から別の平均風速にゆっくりと変化するプロセスである。Simulink で Ramp モジュールを使用して。
- (3) ステップ風：ステップ風速は時間の経過に伴う風速変化の特性を反映している。Simulink で Step モジュールを使用して確立できる。
- (4) 乱流風：乱流風は風エネルギーの不規則な変化である。平均風速に乱流を重ね合わせて乱流風速を生成する。

本研究の風速  $V_0$  は 5[m/s] から 11[m/s] の範囲で、120 秒間で低風速から定格風速まで、途中で風速一定での運転を挟みつつランプ変化する場合を検討する。途中のランプ変化よりも早い過渡応答を確認するために、風速一定での運転の途中に振幅 0.5[m/s]・周波数 0.2[Hz] の正弦波を重畳している。図 4.11 にこの風速を示す。

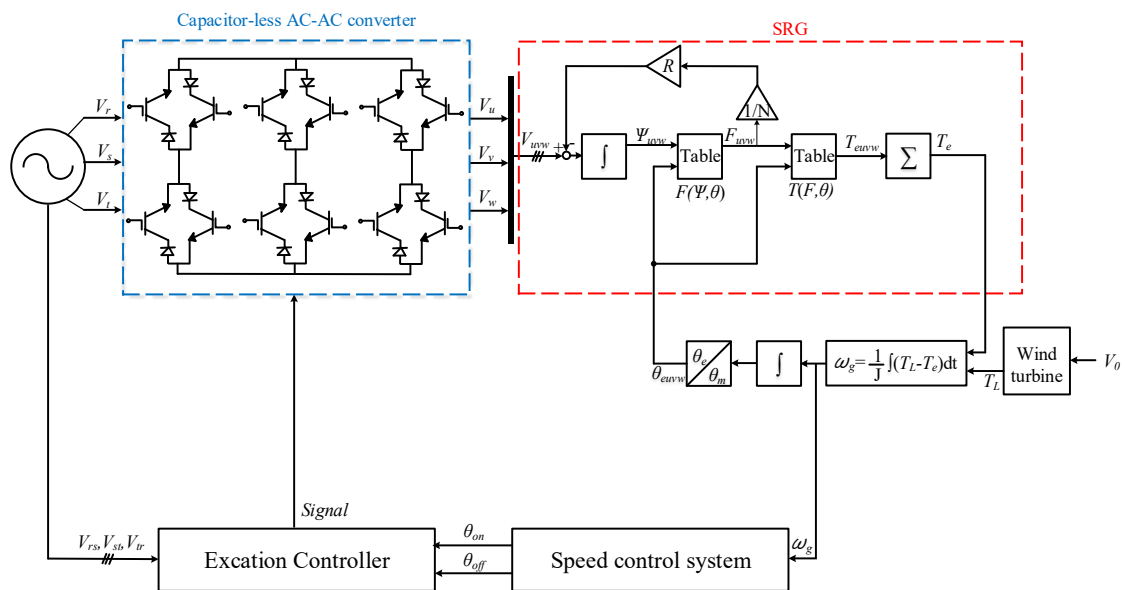


図 4.9 SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器を用いた  
風力発電のシミュレーションシステム  
Fig.4.9. Simulation of wind power generation  
system using SRG and capacitorless AC-AC converter.

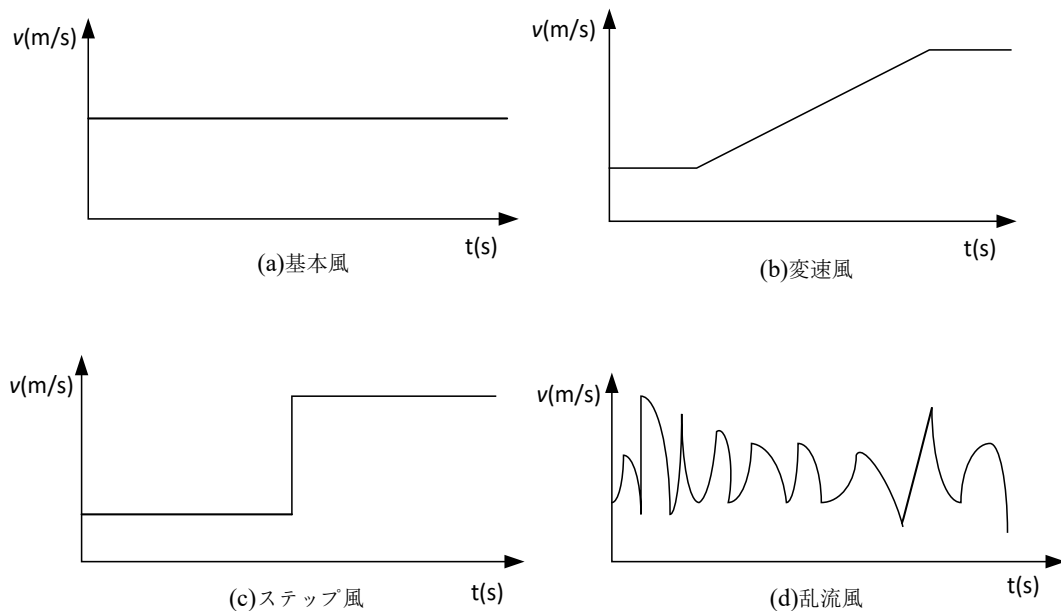


図 4.10 風速モデル例  
Fig.4.10. Simulation example of wind velocity.

### 4.3.3 風車タービンモデル

4.2 節で導出された計算式から，風車の出力特性計算を行う手順を以下に示す。

- (1) 風車ブレードを半径方向に適切な数に分割する。
- (2) 各分割点において，ローカルな特性値の計算を行う。
  - a) 分割点位置において，ニュートン法で繰り返し計算による式(4.26),(4.27),(4.28)の解  $a, a', \phi$  を求める。式中  $C_l, C_d$  は  $\alpha$  の関数ため， $\alpha$  に対して  $C_l, C_d$  を計算する。また， $B, l, \beta, v, \omega$  は条件として与えられる変数である。
  - b) 式(4.29),(4.30),(4.31)により，分割点位置の  $C_P, C_T, C_Q$  を計算する。
- (3) 得られた特性値  $C_P, C_T, C_Q$  により，式(4.32),(4.33),(4.34)の積分計算を行い，風車の  $P, T, Q$  を求める。

翼素運動量に基づいて，風車の出力特性計算を行う手順に従って Matlab プログラムを作成する。作成されたプログラムは Matlab/Simulink で S-Function を使用する。本研究の提案システムに適用するために表 4.1 に 3 枚プロペラ式風車のパラメータを示す。図 4.12, 図 4.13, 図 4.14 に風車の出力特性を示す。図 4.14 で示すようにピッチ角が一定(10[度])であるという条件で周速比が 6.181 になるように風車回転数を制御すれば，最大出力が得られることが分かる。

### 4.3.4 機械系

図 4.15 で示すように，風車と SRG の間に増速機を設けることを仮定する。風車側と SRG 側の機械系の運動方程式は次式で表される。

$$T_w - T_1 - B_w \omega_w = J_w \frac{d\omega_w}{dt} \quad (4.35)$$

$$T_2 - T_g - B_g \omega_g = J_g \frac{d\omega_g}{dt} \quad (4.36)$$

増速機の歯数について風車側を  $n_1$  とし，SRG 側を  $n_2$  とするとギヤ比は  $n_2/n_1$  となる。このギヤ比を用い，風車の回転角速度  $\omega_w$  と SRG の回転角速度  $\omega_g$  の関係は次式で表される。

$$\omega_w = \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \omega_g \quad (4.37)$$

ここで， $T_w, T_g$  : 風車側の SRG 側発生トルク， $T_1, T_2$  : 風車側の SRG 側軸トルク， $\omega_w, \omega_g$  : 風車側の SRG 側ロータ回転速度， $B_w, B_g$  : 風車側の SRG 側粘性摩擦係数， $J_w, J_g$  : 風車側の SRG 側慣性モーメントである。式(4.7)，式(4.8)からギヤ比  $n_2/n_1$  を用いて  $\omega_w$  を消去すると次式となる。

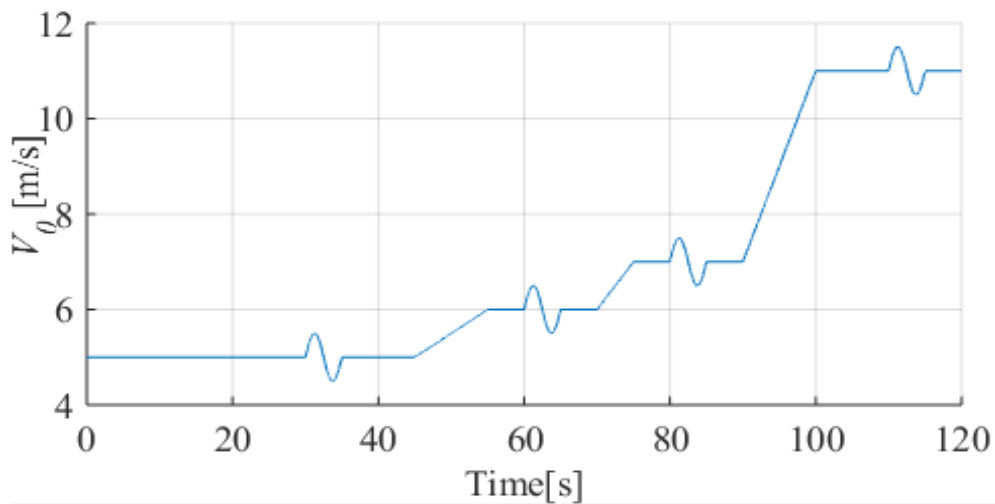


図 4.11 風速

Fig.4.11. Wind velocity.

表 4.1 風車タービンのパラメータ

Table 4.1. Parameters of wind turbine.

Distance from center of rotor[m]	1.216
Pitch angle[degree]	10
Rated output [kW]	6
Profile of NACA	NACA4415

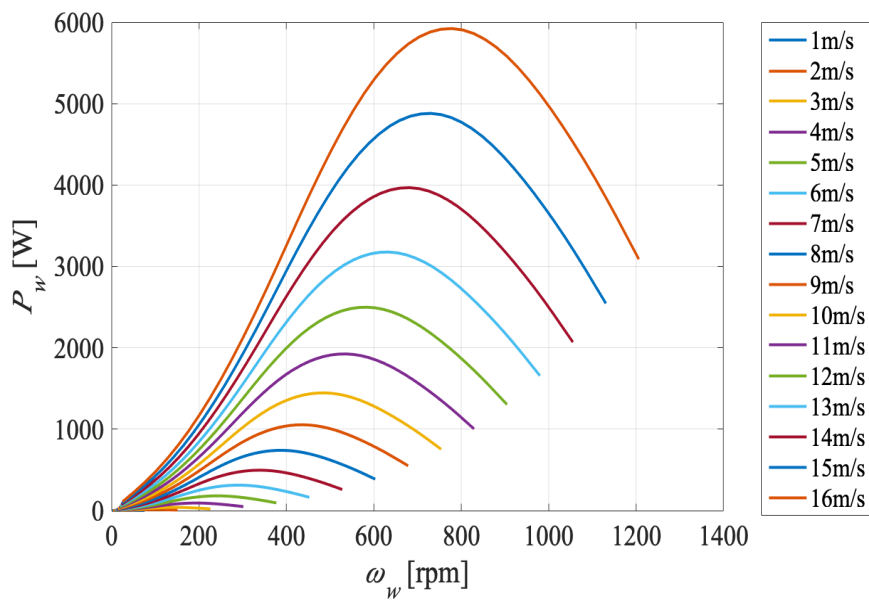


図 4.12 回転速度と出力の関係

Fig.4.12. Relationship between rotation speed and output.

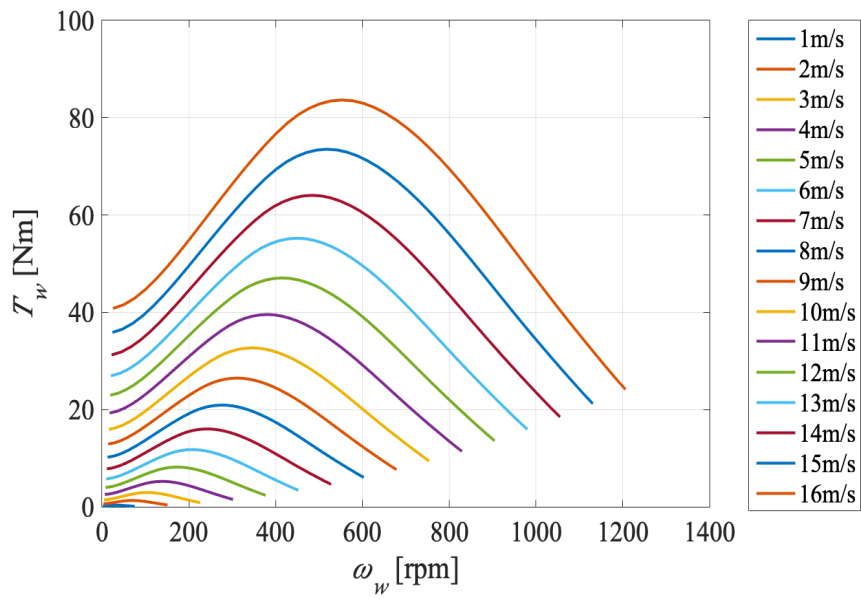


図 4.13 回転速度とトルクの関係

Fig.4.13. Relationship between rotation speed and torque.

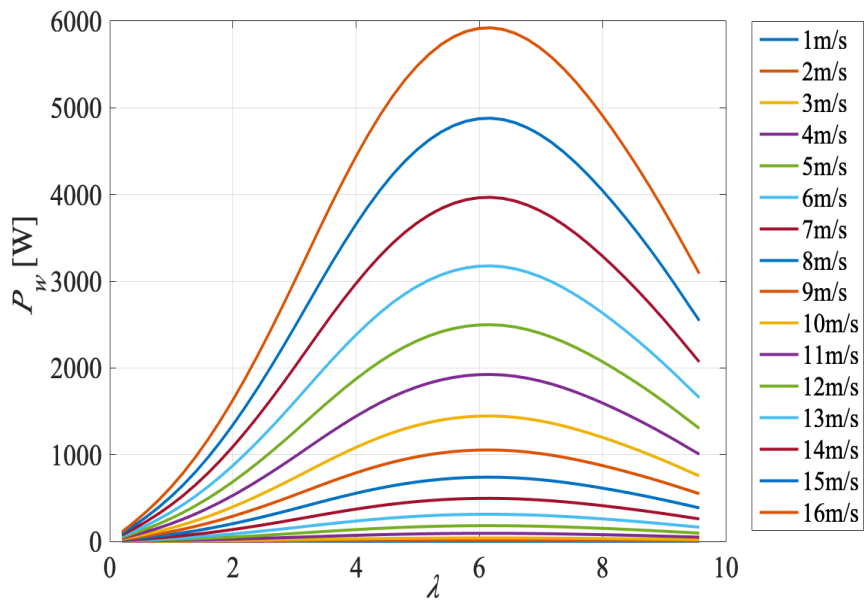


図 4.14 周速比と出力の関係

Fig.4.14. Relationship between tip speed ratio and output.

$$\left\{ \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 J_w + J_g \right\} \frac{d\omega_g}{dt} + \left\{ \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 B_w + B_g \right\} \omega_g = \left( \frac{n_2}{n_1} \right) T_w - T_g \quad (4.38)$$

また、回転子位置は角速度を積分することにより角速度が次式で得られる。

$$\theta = \int \omega dt \quad (4.39)$$

#### 4.3.5 SRG

使用する定格出力 3.5kW, 12/8SRG のパラメータを表 4.2 に示す。目下、SRG のモデリングに対して Matlab/Simulink では二つ方法がある。

- (1) Matlab の M ファイルを Simulink に組み合わせて、SRG モデリング分析を実現する。この方法の M ファイルでは、動的な調整を実現できない。発電機のサイズまたはパラメータを変更する場合、プログラムを大幅に調整する必要がある。これにより、多くの作業が増加し、迅速かつ簡単なシミュレーション修正に役立たない。
- (2) 有限要素解析により、発電機の磁束、インダクタンス、トルクなどデータを計算し、MATLAB / Simulink のルックアップテーブルにデータをロードし、シミュレーションを行う。この方法は、MATLAB / Simulink のシンプル、変更しやすい、高速なシミュレーション速度の利点を実現できる。

図 4.16 に本論文の SRG のモデルを示す。入力励磁電圧、回転子位置による相電流、インダクタンスと電磁トルクを計算している。モデルの中の起磁力、トルクとインダクタンスはルックアップテーブルを参考する。発電機のトルク、鎖交磁束と回転子位置の関係を得るために、JMAG で有限要素法による磁場解析を行う。図 4.17, 図 4.18 に磁場解析結果を示す。図 4.19 で示すように SRG のモデルは有限要素法による磁場解析において得られる解析データを用いて作成される。式(2.4)で計算される磁束鎖校数  $\psi_j$  と回転子位置  $\theta$  からルックアップテーブル  $F_j(\psi_j, \theta)$  (*theta-FL-MMF*)により起磁力  $F_j$  を参照し、 $F_j$  と  $\theta$  からトルク  $T_j$  を参照できるルックアップテーブル  $T_j(F_j, \theta)$  (*theta-MMF-T*)により構成される。

#### 4.3.6 キャパシタレス AC-AC 変換器

第 3 章で説明したキャパシタレス AC-AC 変換器のシミュレーションモデルは、Matlab/Simulink における Simscape を用いて構築した。キャパシタレス AC-AC 変換器の主な構成要素である双方向スイッチは Simscape で提供されている IGBT とダイオードの組合

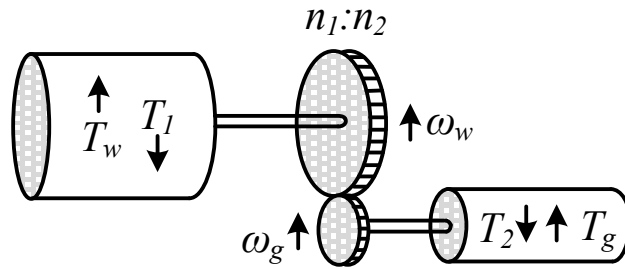


図 4.15 機械系

Fig.4.15. Mechanical Model.

表 4.2 SRG のパラメータ

Table 4.2. Parameters of SRG.

Stator outside diameter [mm]	182
Rotor outside diameter [mm]	96.33
Rated output [kW]	3.5
Air gap [mm]	0.3
Core length [mm]	146
Number of coil turns [turns/pole]	44

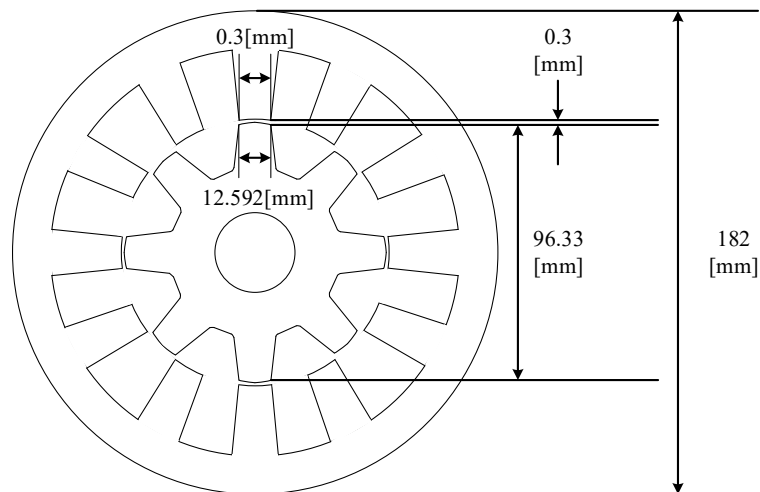
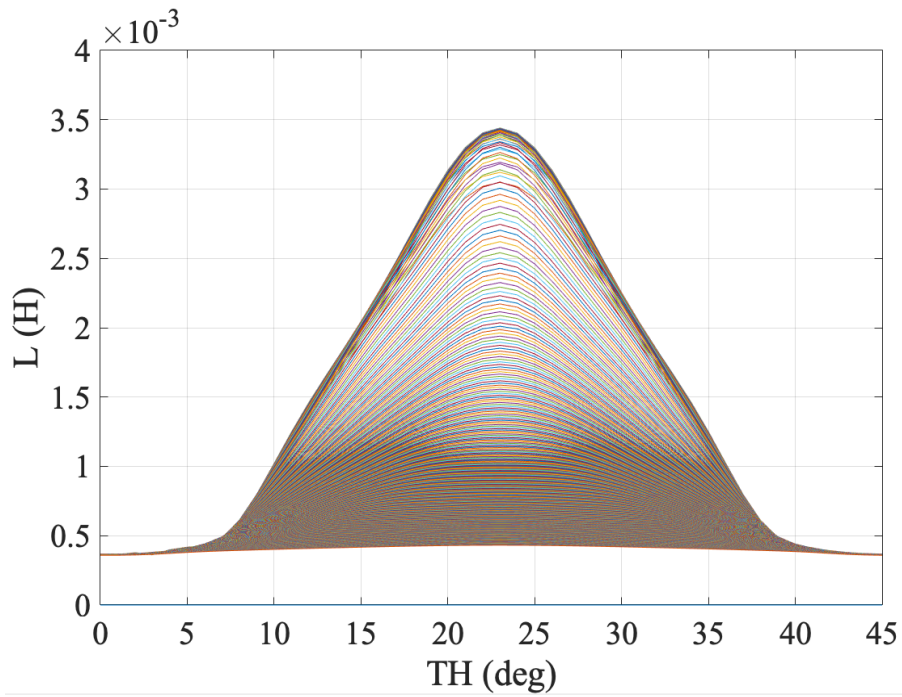


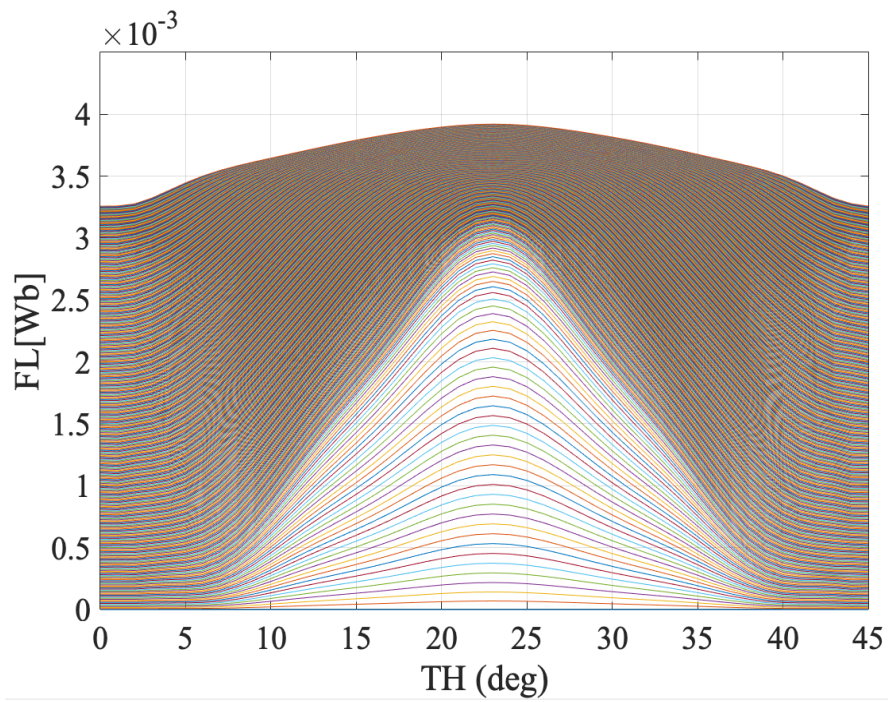
図 4.16 SRG の構造

Fig.4.16. Structure of SRG.





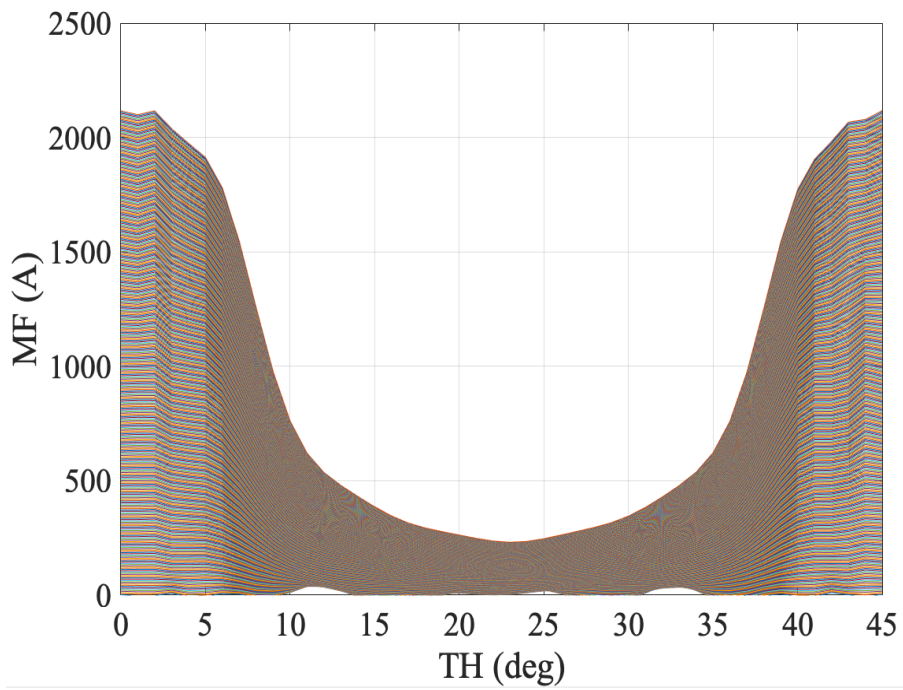
(a) Rotor position and inductance of SRG



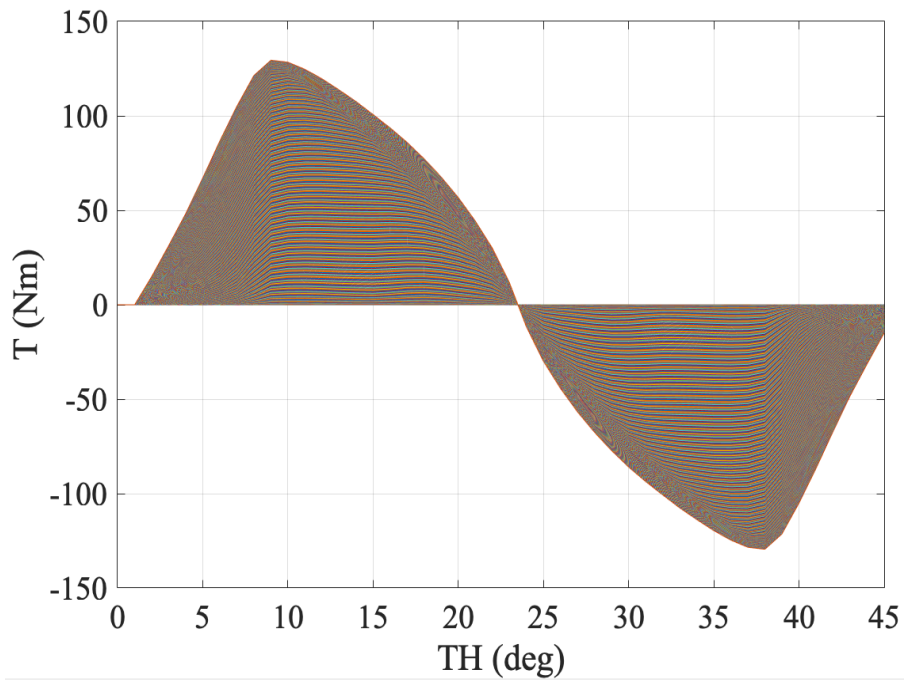
(b) Rotor position and flux linkage of SRG

図 4.17 SRG の解析データ I

Fig.4.17. Analysis data of SRG I.



(c) Rotor position and magnetomotive force of SRG (*theta-FL-MMF*)



(d) Rotor position and torque of SRG (*theta-MMF-T*)

図 4.18 SRG の解析データ II

Fig.4.18. Analysis data of SRG II.

せによりモデリングしている。各 IGBT のゲート信号は次節で説明する制御システムで生成し入力される。

#### 4.3.7 コントロール

コントロールでは、主に速度制御システムにおける励磁タイミングの演算と演算された励磁タイミングに基づくゲート信号の生成を行っている。SRG を発電効率が高い状態で運転するために、励磁電流を素早く立ち上げ、発電モードに入るようにしたい。キャパシタレス AC-AC 変換器は、式(3.5)で示したように、系統側の三相交流電源の相電圧を直接接続することになる。つまり励磁巻線には線間電圧が印加されることになるので、最大線間電圧を利用して励磁し、最小線間電圧を利用して回生する方が良いので、線間電圧を検出し、励磁及び回生に利用する線間電圧を考えている。

第 3 章で述べたように、キャパシタレス AC-AC 変換器では電源短絡を起こさないように、電源電圧とコイル電流の状態を把握しながら、SRG の回転子位置  $\theta$  に応じて適切な双方向スイッチを選択し、各パワーデバイスのオンオフを制御する必要がある。図 4.20 に制御システムを示す。回転子位置検出ブロックでは、SRG の回転軸に設置されているロータリエンコーダ (RE) の出力信号より回転子位置  $\theta$  を演算する。励磁タイミングブロックでは、 $\theta$  に対して励磁タイミングを演算する。励磁タイミングに基づいて、スイッチングモードを選択する際に、線間電圧の検出値から励磁時 (力行時) は線間電圧が最大となっている線間を選択し、発電時 (回生時) は線間電圧が最小となる線間を選択する。選択された線間電圧への転流は 4 ステップ転流方式を用いる。

SRG の風力発電システム中、三相交流電源のエネルギーはキャパシタレス AC-AC 変換器を介して SRG の巻線に供給しているため、キャパシタレス AC-AC 変換器の制御方法が全体風力発電システムに直接的な影響する。第三章の基本理論に基づき、SRG に適用できる制御を行う。

制御方法は力行前、力行、力行から回生に変更、回生、回生後の五つの部分に分ける。力行前は SRG 起動角 ( $0^\circ$ ) から開始角まで、最大相電圧を選択する。最大相電圧を選択する場合、巻線の正端子と負端子間電位が等しいため、巻線の誘起電圧が零になる。力行は開始角から終了角まで、最大線間電圧を選択する。この場合は巻線の正端子と負端子間電位が大電位と小電位の正の差値ため、巻線の誘起電圧が最大相電圧と最小相電圧の差値になる。回生の開始のために、力行から回生に変更するのは終了角にあるとき、最大線電圧から最小相電圧に変換される。回生は SRG 終了角から回生終了角まで、最小線間電圧を選択する。最小線間電圧を選択する場合、巻線の正端子と負端子間電位が最小電位と最大電位の負差値た

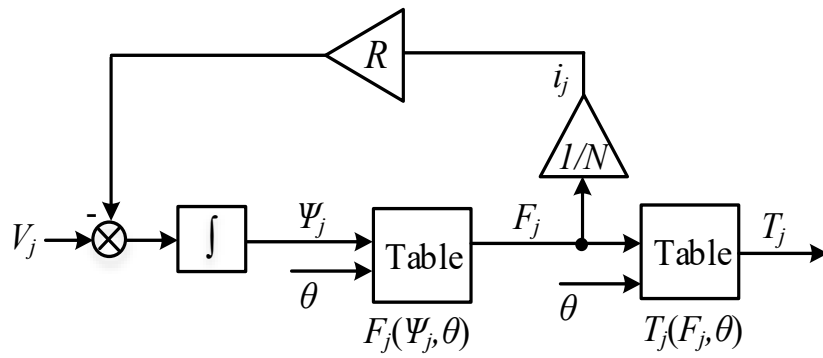


図 4.19 SRG のモデル  
Fig.4.19.SRG Model.

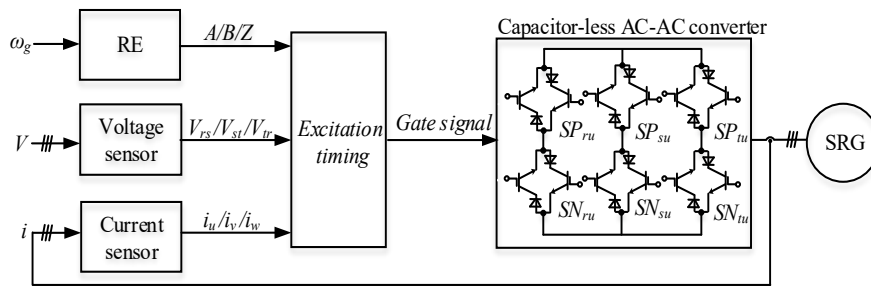


図 4.20 SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器を用いた励磁制御システム  
Fig.4.20. Excitation control system using SRG and capacitor-less AC-AC converter.

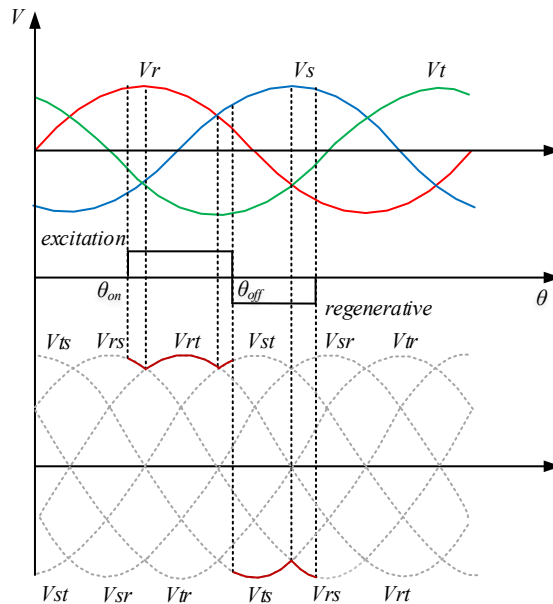


図 4.21 三相電圧を用いて励磁方法  
Fig.4.21. Excitation method using 3 phase voltage.

め、巻線の誘起電圧は最小相電圧と最大相電圧の差値になる。最後、回生後は SRG 回生終了角から停止角(45°)まで、最小相電圧を選択する。最小相電圧を選択する場合、巻線の正端子と負端子間電位が等しいため、巻線の誘起電圧が零になる。図 4.21 は三相電圧を用いた励磁方法を示す。

SRG の回転子位置と検出している線間電圧  $V_{rs}$ ,  $V_{st}$ ,  $V_{tr}$ ,  $V_{sr}$ ,  $V_{ts}$ ,  $V_{rt}$  に基づいて、図 4.21 で示すように起動角(0°)から開始角( $\theta_{on}$ )にある時は、最大相電圧  $V_u$  を選択して励磁を開始し、途中で最大である線間が変わるので  $V_{rr}$  に切り替えて励磁を続ける。開始角から終了角まで ( $\theta_{on}$  から  $\theta_{off}$  の期間) にあるときは、オン時に最大である  $V_{rs}$  を選択して力行を開始し、途中で最大である線間が変わるので  $V_{rt}$  から  $V_{st}$  に切り替えて力行を継続し、励磁電流を素早く立ち上げる。また  $\theta$  が  $\theta_{off}$  を通過したら最小である  $V_{ts}$  に切り替え、途中で最小となる線間が変わるので  $V_{rs}$  に切り替えて、力行モードに運行している。回生モードに素早く移行させるために、終了角にあるときは、 $V_{st}$  から  $V_{ts}$  に切り替えて回生を開始させる。終了角( $\theta_{off}$ ) から回生終了角まで、最小である線間が変わるので  $V_{ts}$  から  $V_{rs}$  に切り替えて回生モードで運行している。最後に、回生終了角から停止角(45°)にある時、最小相電圧  $V_{rr}$  を選択し、運行を終了する。

励磁巻線に接続する線間電圧については、線間短絡を生じないように表 3.2 で示すスイッチングモードのいずれかを選択する必要がある。またスイッチングモードの切り替えでは、常に電流経路を確保する必要があるため、各相電流の検出値の電流極性を監視し、その電流極性に応じて各パワーデバイスのオンオフの順序を 4 ステップの形式で決定する 4 ステップ電流転流方式を用いる。図 4.22, 図 4.23 に 4 ステップ電流転流方式を示す。

#### (1) 力行前の転流方式

図 4.22(a)に最大相電圧  $V_u$  から  $V_{rr}$  に切り替える場合のスイッチング動作を示す。余分電圧の発生を防ぐために、 $SP_{ru1}, SP_{tu1}$  をオフにする。最大相電圧  $V_{rr}$  を選択し、巻線の正端子と負端子間電位が等しいため、巻線の誘起電圧が零になる。また、励磁前の転流方式と回生後の転流方式が同じであるため、回生後の場合に相応のスイッチに切り替えることで、このまま適用できる。

#### (2) 力行の転流方式

図 4.22(b)に  $u$  相電流  $i_u$  が正方向に流れている状態を維持しつつ、印加する線間電圧を  $v_{rt}$  に切り替える場合のスイッチング動作を示す。最初に step 1 で示すように  $SN_{su1}$  をオフする。このとき  $i_u$  は  $SN_{su2}$  を通過しているので、 $SN_{su1}$  をオフすることによる回路への影響はない。次に step 2 で示すように  $SN_{tu2}$  をオンする。このとき  $V_s < V_t$  なので、電流は  $SP_{ru1}$  から電流は  $SN_{su2}$  を流れ続ける。更に step 3 で示すように  $V_s > V_t$  となり  $SN_{su2}$  を流れる電流がなくなったら  $SN_{su2}$  をオフし、電流経路を  $SP_{ru1}$  から  $SN_{tu2}$  に切り替える。最後に step 4 において、 $SN_{tu1}$  をオンして、 $s$  相から  $t$  相への転流を完了する。

図 4.23(c)に  $u$  相電流  $i_u$  が正方向に流れている状態を維持しつつ、印加する線間電圧を  $v_{st}$  に切り替える場合のスイッチング動作を示す。最初に step 1 で示すように  $SP_{ru2}$  をオフする。このとき  $i_u$  は  $SN_{u2}$  を通過している。次に step 2 で示すように  $SP_{su1}$  をオンする。このとき  $V_s < V_r$  なので、電流は  $SP_{ru1}$  から  $SN_{u2}$  を流れ続ける。更に step 3 で示すように  $SP_{ru1}$  を流れる電流がなくなったら  $SP_{ru1}$  をオフし、電流経路を  $SP_{su1}$  から  $SN_{u2}$  に切り替える。最後に step 4 において、 $SN_{u1}$  をオンして、 $r$  相から  $s$  相への転流を完了する。また、力行の転流方式と回生の転流方式が同じであるため、回生の場に相応のスイッチに切り替えることで、このまま適用できる。

### (3) 力行から回生に変更するときの転流方式

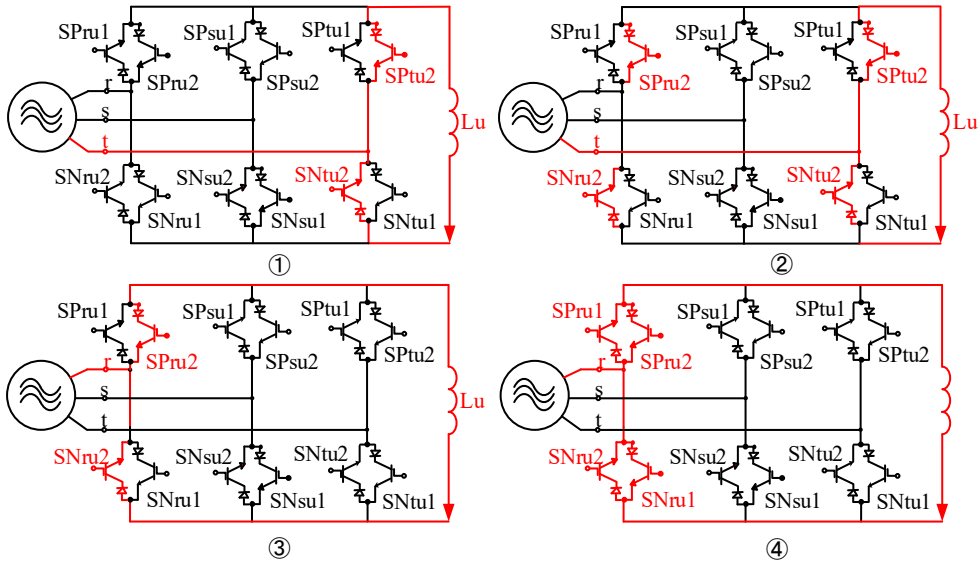
図 4.23(d)に  $u$  相電流  $i_u$  が正方向に流れている状態を維持しつつ、印加する線間電圧を  $v_{st}$  から  $v_{sr}$  に切り替える場合のスイッチング動作を示す。最初に step 1 で示すように  $SP_{tu1}, SN_{tu2}$  をオンし、電流は  $SP_{su1}$  から電流は  $SN_{tu2}$  を流れ。次に step 2 で示すように  $SP_{tu1}, SP_{su1}$  と  $SN_{tu2}, SN_{su2}$  を同時にオンする。このとき  $V_s < V_t$  なので、電流は  $SP_{su1}$  から電流は  $SN_{tu2}$  を流れ続ける。更に step 3 で示すように  $V > V_s$  となり  $SP_{su1}$  を流れる電流がなくなったら  $SP_{su1}$  をオフし、電流経路を  $SP_{tu1}$  から  $SN_{su2}$  に切り替える。最後に step 4 において、 $SP_{su2}$  をオンして、 $s$  相から  $t$  相へ転流を完了する。

## 4.3.8 速度制御系

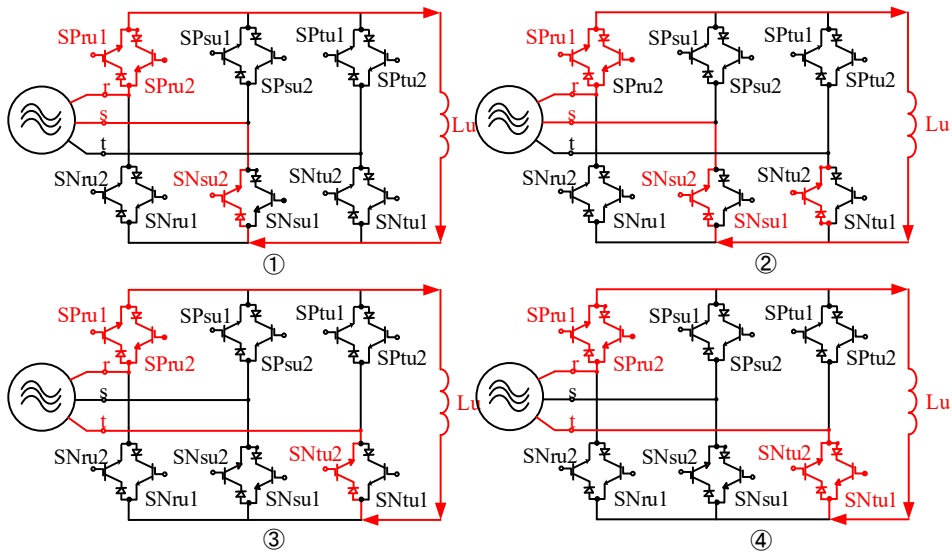
電源側に逆潮流するように運転するとき回転方向とは逆方向の  $T$  が発生するので、風車トルク  $T_w$  によって回転を維持する必要がある。

VSWPGS は WT 効率を最大に維持するため風速に応じて風車回転数を制御している。具体的には WT と増速機を介して接続される SRG を速度制御する。その速度制御系を構築するにあたり、速度制御系の操作量は SRG の  $T$  に対して線形性があることが望ましい。操作量の候補として励磁タイミングと  $v$  が考えられるが、インバータ効率を重視してシングルパルスでの励磁を行うので、操作量は励磁タイミングに絞られる。しかしながら、励磁タイミングと  $T$  との関係式は存在しない。そこで、4.3.5 節で説明した有限要素法静磁場解析結果から構築する SRG モデルを用いるシミュレーションを実施し、予め励磁タイミング ( $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$ )、速度指令  $\omega_g^{ref}$ 、そしてトルク指令  $T_g^{ref}$  の関係をテーブルデータとして算出しておく。

図 4.24 に予め算出しておいた  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  に対するルックアップテーブルを示す。図 4.25 の



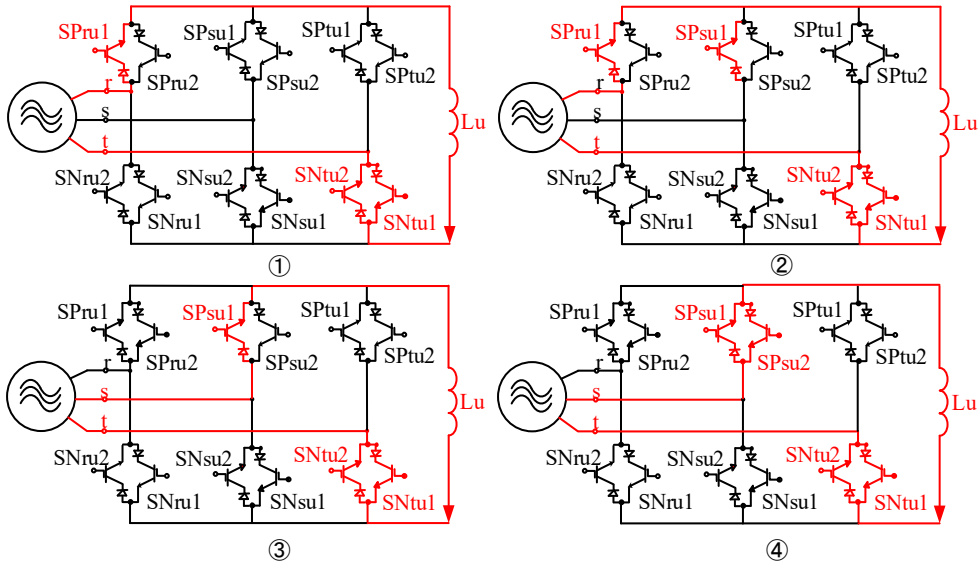
(a) 力行前の転流方式



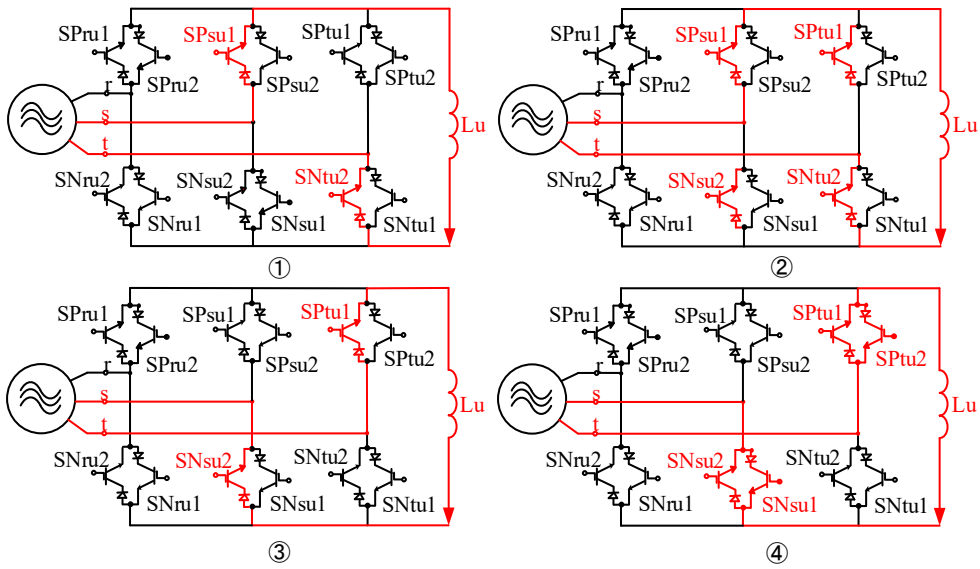
(b) 線間電圧  $v_{r1}$  から  $v_{r2}$  へ切り替える転流方式

図 4.22 4 ステップ電流転流方式 I

Fig.4.22. 4-step commutation method I.



(c)線間電圧  $v_{rl}$  から  $v_{st}$  へ切り替える転流方式



(d) 力行から回生に変更するときの転流方式

図 4.23 4 ステップ電流転流方式 II

Fig.4.23. 4-step commutation method II.



速度制御システムでは、 $\omega_g^{ref}$ と $T_g^{ref}$ を入力として、図 4.24 (a)の $\theta_{on}$ に対するルックアップテーブルを参照することによって $\theta_{on}$ を呼び出し、ゲート信号生成器に入力している。 $\theta_{off}$ についても同様の方法により、図 4.24 (b)の $\theta_{off}$ に対するルックアップテーブルを参照することにより $\theta_{off}$ を呼び出し、ゲート信号生成器に入力している。このような $\theta_{on}$ と $\theta_{off}$ を同時に決定する機構を導入することにより速度制御帯域を確保している。速度制御システムを構築するにあたり図 4.24 のルックアップテーブルで決定される励磁タイミングによって、ある程度のトルクの線形性が確保されている必要がある。SRG の  $T$  が小さくなるように  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  の初期値を 15 度と 25 度に設定しておき、風速がカットイン風速を超えたら WT の  $T_w$  により起動させる。その後は図 4.25 で示すように、速度指令  $\omega_g^{ref}$  と実速度  $\omega_g$  との偏差を入力とする PI 制御器によって  $T_g^{ref}$  を演算し、この  $T_g^{ref}$  から  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  の各ルックアップテーブルを参照する。

図 4.24 のルックアップテーブルの作成方法について、図 4.26 から図 4.35 までに示す 10 種類の回転数を例に用いて説明する。図 4.26 から図 4.35 までのすべての(a)の赤実線は、負荷機で速度制御を行い、回転速度  $\omega_g$  を 200rpm から 1100rpm まで一定に維持している状態で、 $\theta_{off}$  を 25 度から 30 度の範囲で順番に設定し、過渡シミュレーションにおいて  $T_g^{ref}$  と  $\theta_{on}$  との関係 (プロット) を予め計算することで得ている。更に全ての赤のプロットを考慮して最小二乗法により青実線の  $T_g^{ref}$  と  $\theta_{on}$  との関係式を得ている。図 4.26 から図 4.35 までの(b)は、同様の条件下において、 $\theta_{on}$  を 15 度から 20 度の範囲で順番に設定し、過渡シミュレーションにおいて  $T_g^{ref}$  と  $\theta_{off}$  との関係 (プロット) を予め計算することで得ている。更に全ての赤のプロットを考慮して最小二乗法により青実線の  $T_g^{ref}$  と  $\theta_{off}$  との関係式を得ている。

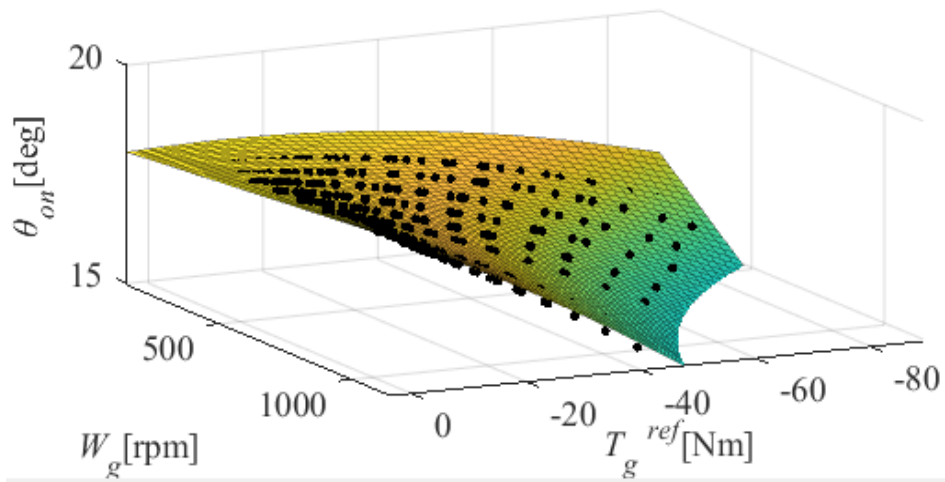
負荷機で維持する  $\omega_g$  を 200rpm から 1100rpm の範囲で変更し、 $T_g^{ref}$  と  $\theta_{on}$  との関係式と  $T_g^{ref}$  と  $\theta_{off}$  との関係式を導出することで、図 4.24 のルックアップテーブルを作成することができる。図 4.26 から図 4.35 までの図では発電効率についても考察しているが、青実線の周辺領域が比較的に高効率となっていることが分かる。

### 4.3 シミュレーション結果

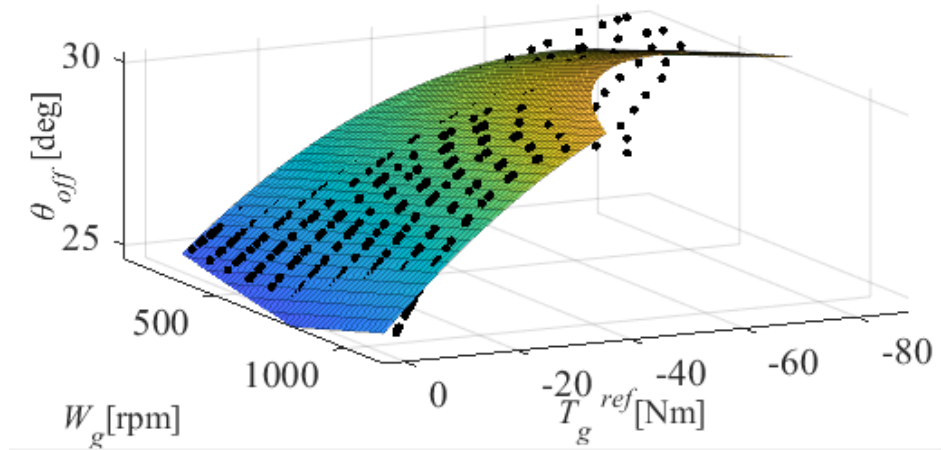
図 4.36, 図 4.37 と図 4.38 に VSWPGS の可変速制御性能を検証するためのシミュレーション結果を示す。図 4.36 (a)の  $T_w$  は、翼素運動量理論に基づく計算データを用いて構築する WT モデル (ルックアップテーブル) から、刻々と変化する  $V_0$  と風車回転角速度  $\omega_w$  の条件に合う値を読み出すことで得られる。図 4.36 (b)に WT 効率が最大となる SRG の回転角速度指令  $\omega_g^{ref}$  に対する回転角速度  $\omega_g$  の応答を示す。 $\omega_g^{ref}$  は、常に WT 効率が最大となる周速比  $x_{max}$  (=6.181) となるように算出するので、 $V_0$  と同じような変化となる。同図より  $\omega_g^{ref}$  と  $\omega_g$  が良く一致していることから、WT 効率が最大値に維持できていることが分かる。ま

た  $\omega_g^{ref}$  と  $\omega_g$  の偏差を入力とする速度 PI 制御器の出力  $T_g^{ref}$  をルックアップテーブルに入力して  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  を読み出している。 $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  は、図 4.37 (c) と図 4.37 (d) で示すように、 $V_0$  つまり  $T_w$  の増加に連動して通電角が増加するように変化している。図 4.38 (e) に SRG の出力を示す。SRG の  $T_g$  は、図 4.38 (f) で示すように  $T_g^{ref}$  に良く追従している。ただし、 $T_g$  は励磁周期ごとの平均値を示している。本稿にて提案する速度制御系が VSWPGS に対して十分な可変速性能を有していることが分かる。

図 4.39, 図 4.40 に提案するキャパシタレス AC-AC 変換器によって SRG の各相に印加している相電圧  $v_u, v_v, v_w$  と相電流  $i_u, i_v, i_w$ , その結果として各相で生じる発生トルク  $T_u, T_v, T_w$  と電力  $P_u, P_v, P_w$  を示す。図 4.39 (a) で示すように、各相電圧は線間電圧の形状となり、一般に SRG に印加する直流電圧とは異なり常に時間変化している。更に VSWPGS では風速に応じて SRG の回転速度を変化させるため、線間電圧と励磁タイミングの同期はできないが、線間電圧の時間変化の影響は短時間に繰り返される励磁により平均化されている。このことは、線間電圧の最大値の平均値 116.96V に対して、同図で示す 3 周期分の相電圧の平均値が 113.5V であることから明らかである。図 4.39 (b) の相電流、図 4.40 (c) の発生トルク、そして図 4.40 (d) の電力から分かるように、線間電圧の時間変化の影響は小さい。



(a) Lookup table for  $\theta_{on}$



(b) Lookup table for  $\theta_{off}$

図 4.24  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  に対するルックアップテーブル

Fig.4.24. Look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$ .

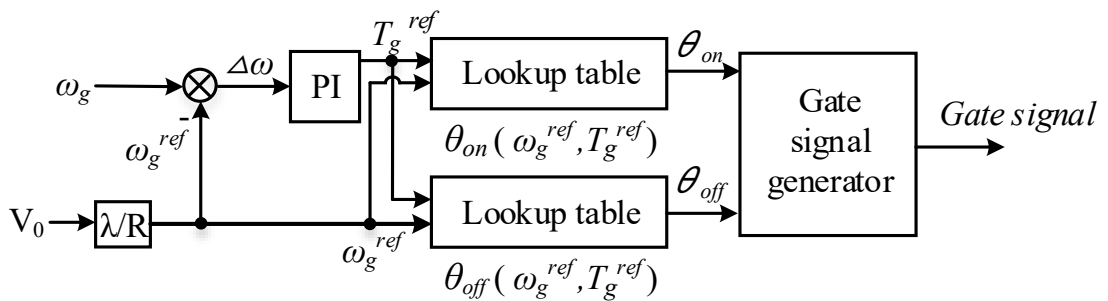
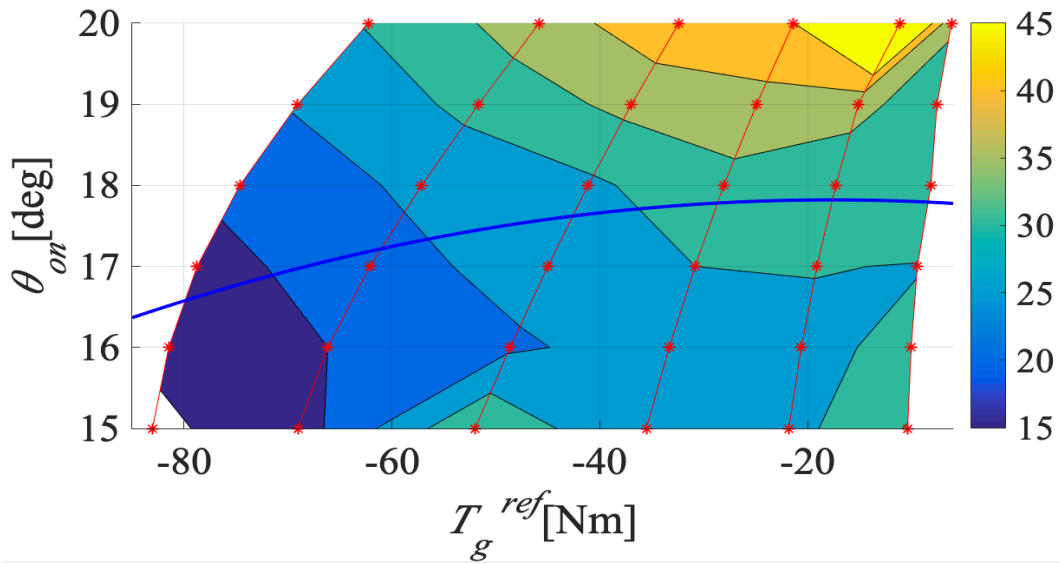
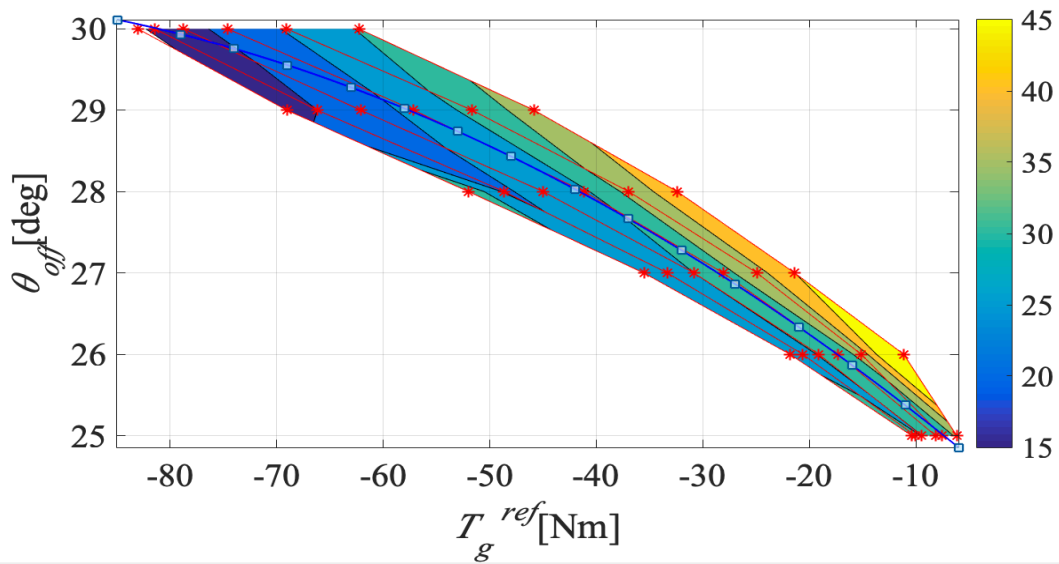


図 4.25 速度制御システム

Fig.4.25. Speed control system.



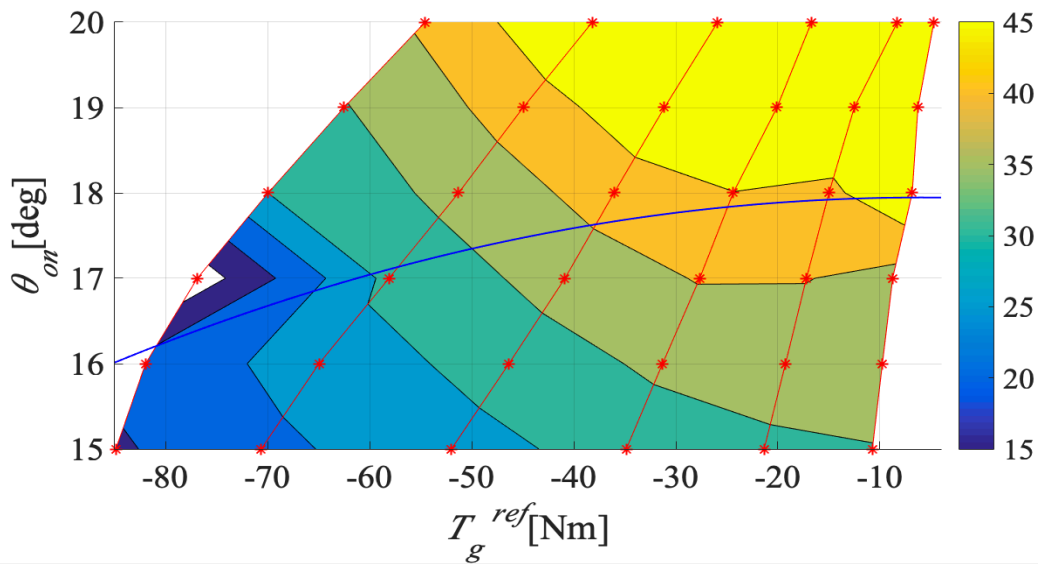
(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$



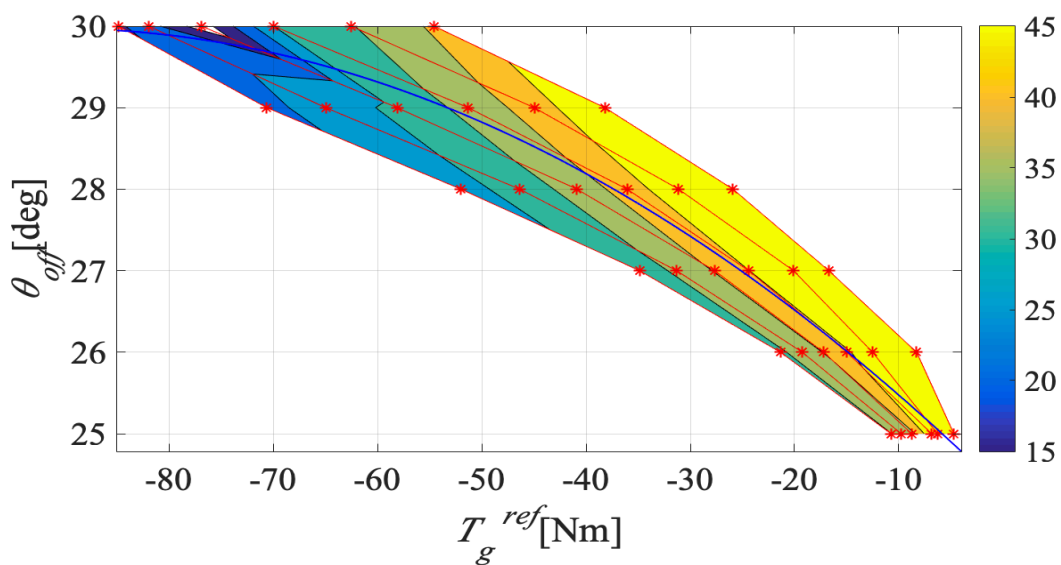
(b) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

図 4.26 200rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.26. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 200rpm.



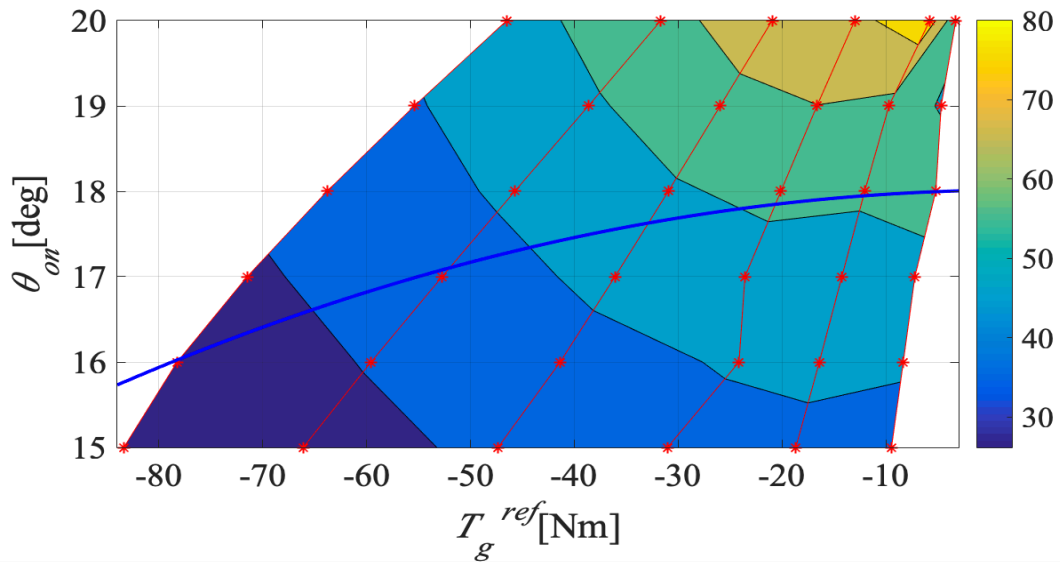
(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$



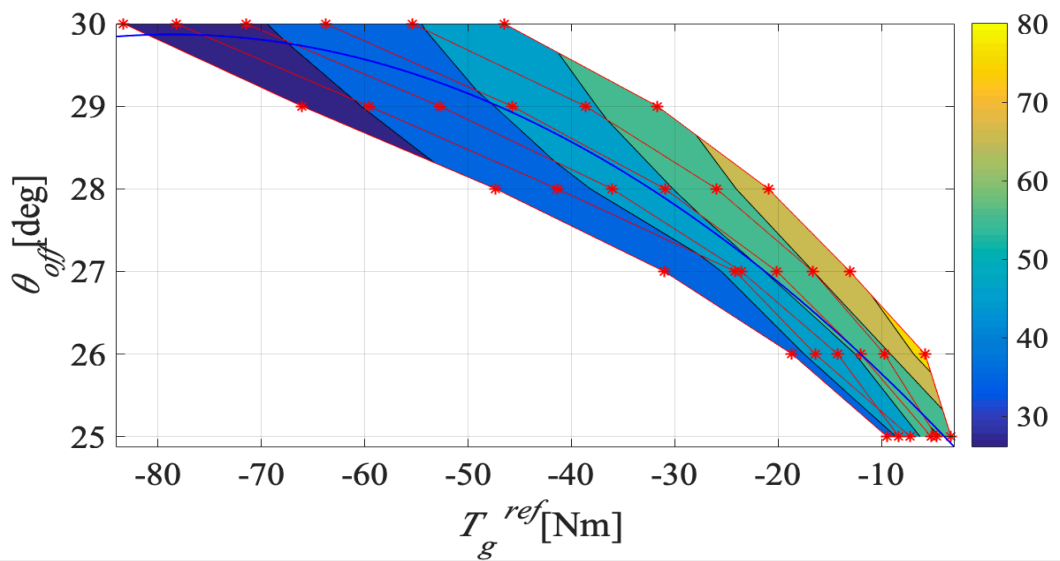
(b) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

図 4.27 300rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.27. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 300rpm.



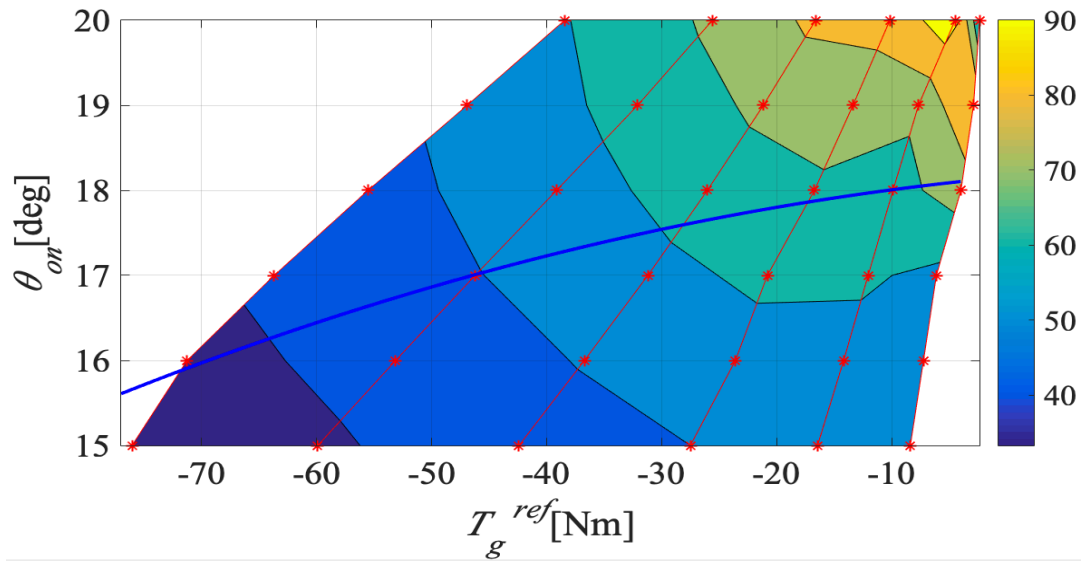
(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$



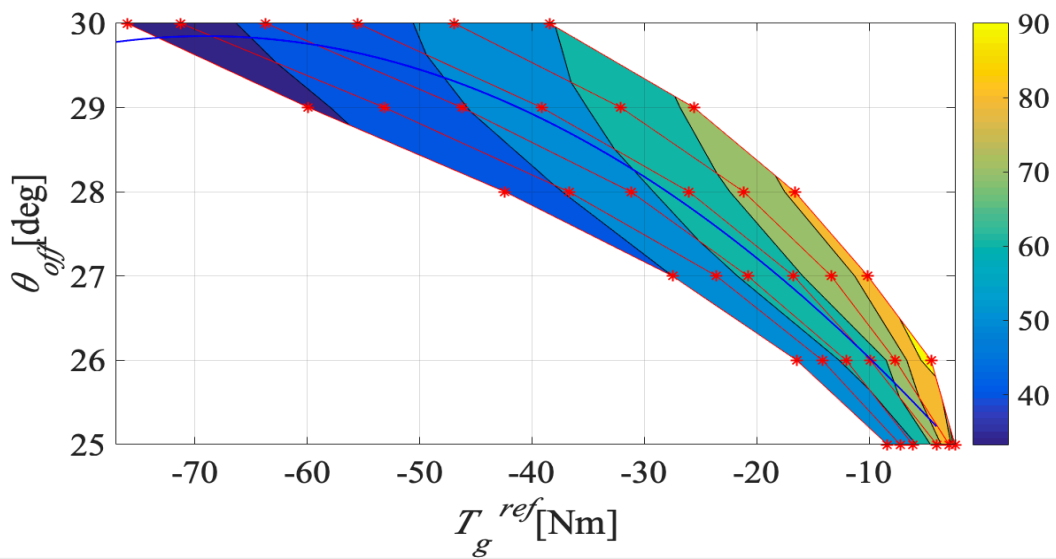
(b) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

図 4.28 400rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.28. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 400rpm.



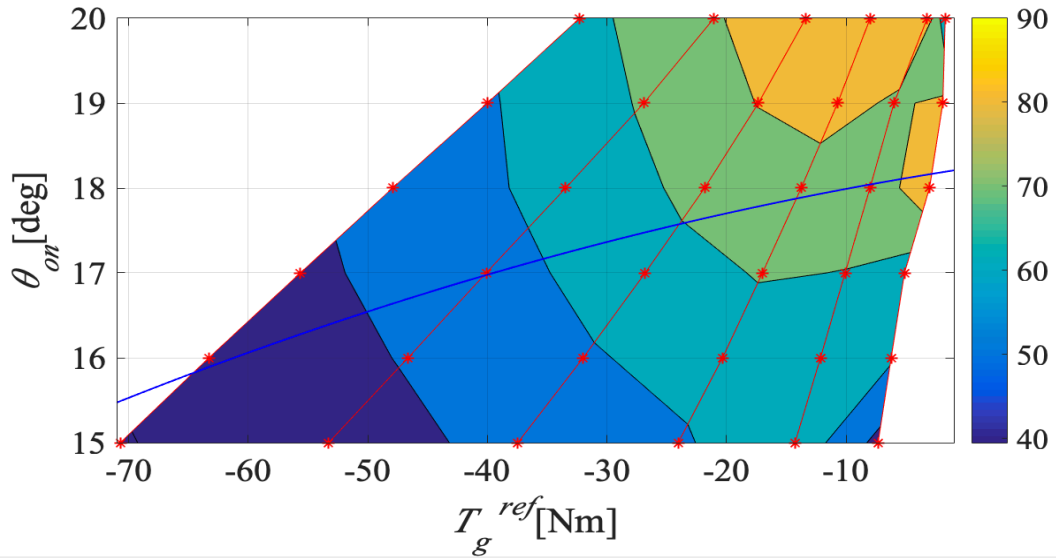
(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$



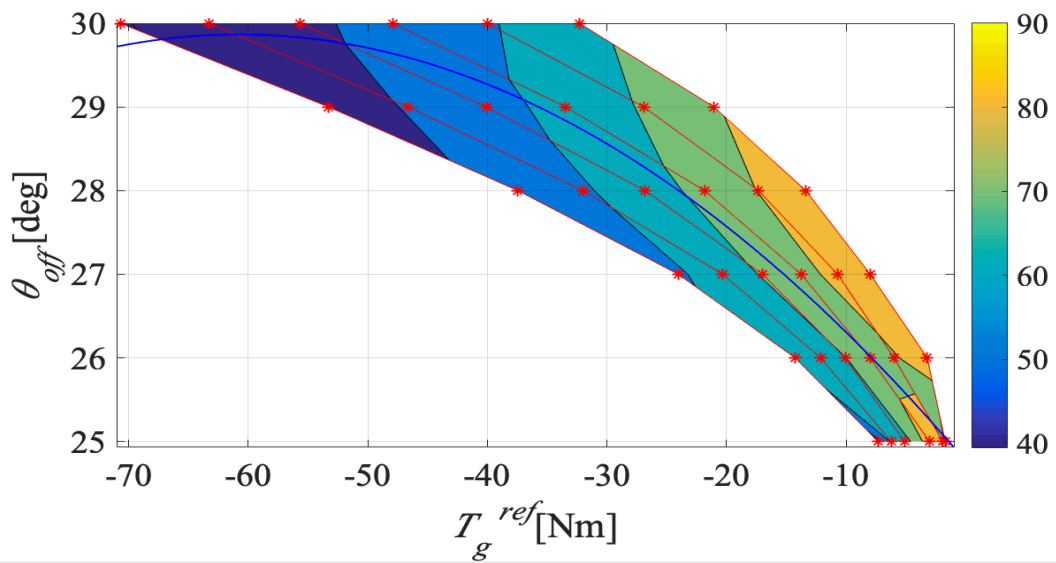
(c) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

図 4.29 500rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.29. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 500rpm.



(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$

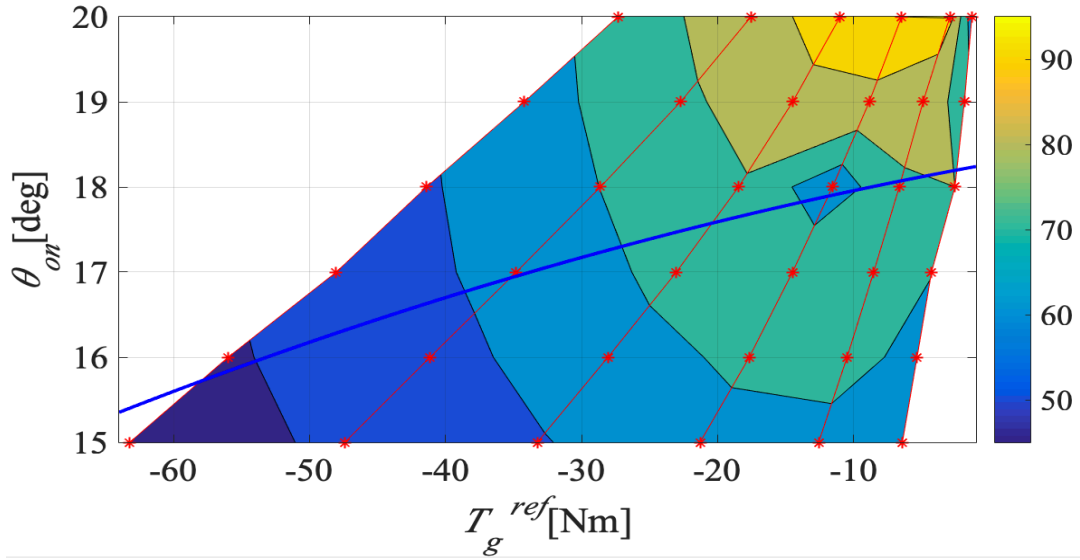


(b) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

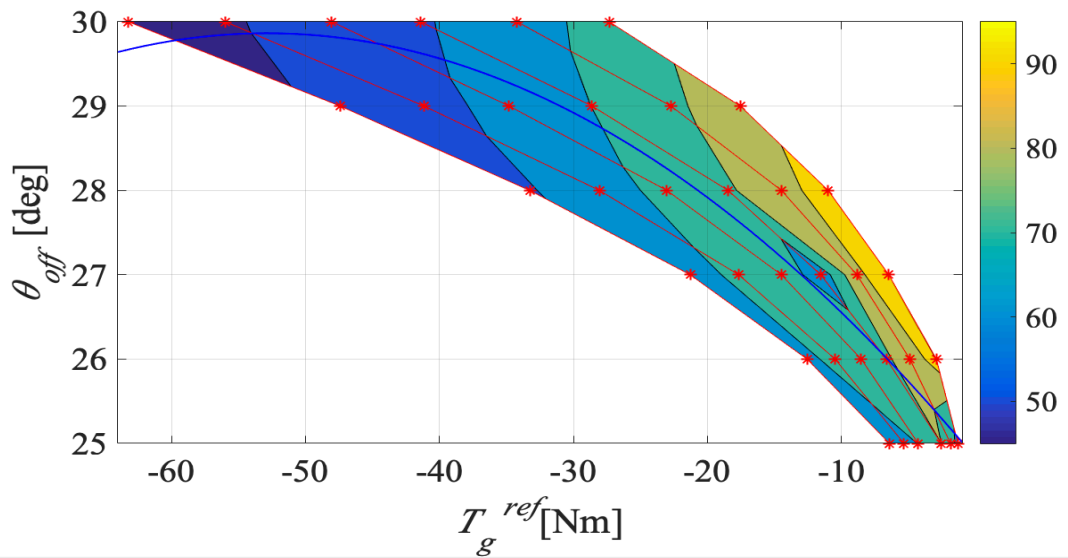
図 4.30 600rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.30. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 600rpm.





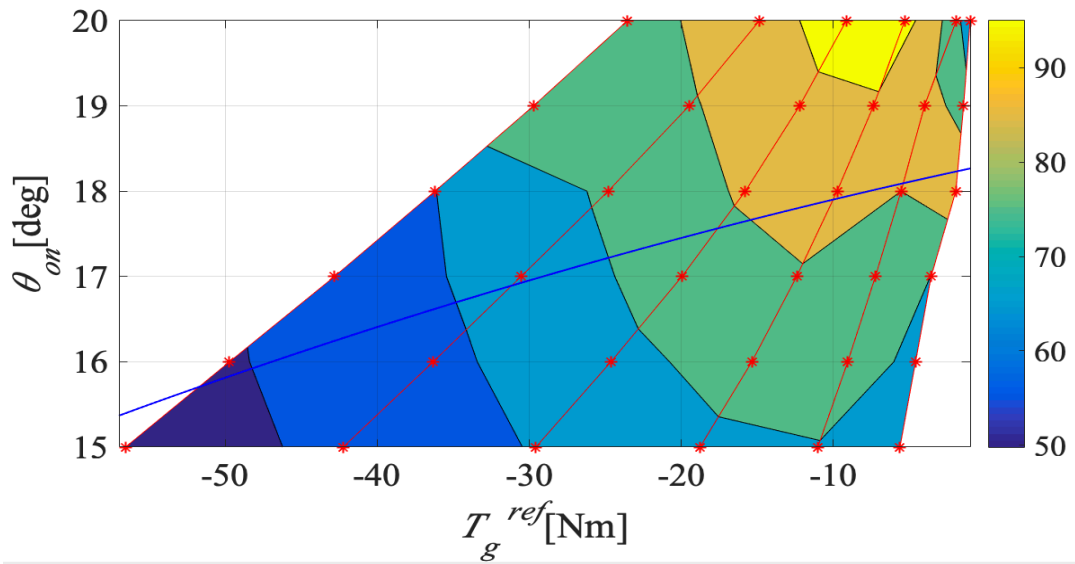
(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$



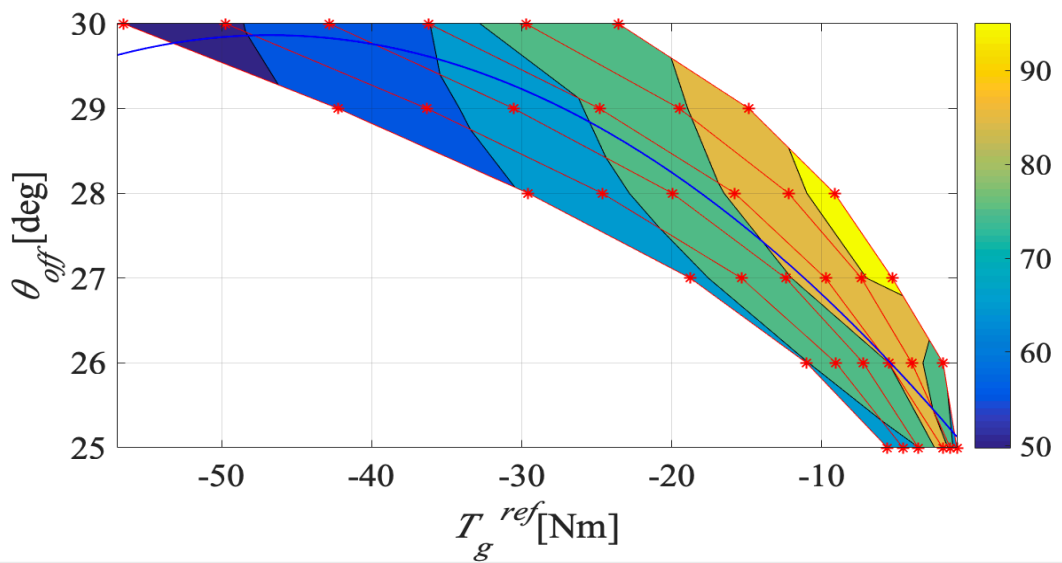
(b) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

図 4.31 700rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.31. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 700rpm.



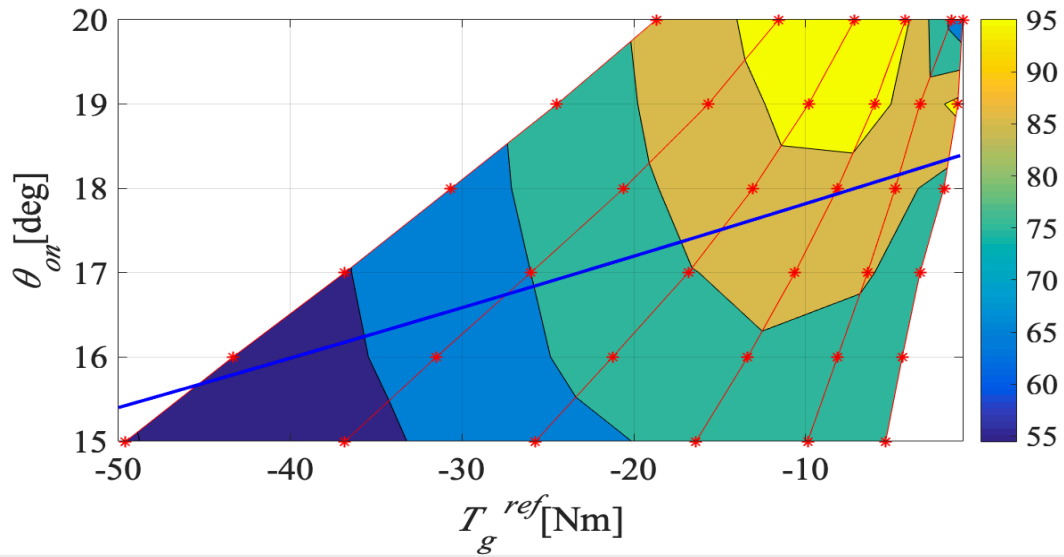
(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$



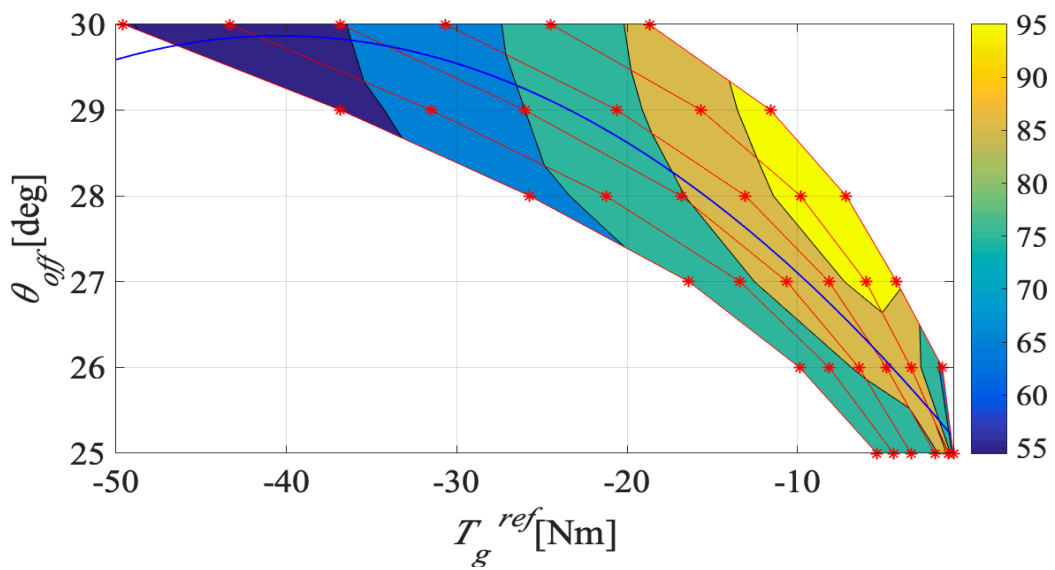
(b) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

図 4.32 800rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.32. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 800rpm.



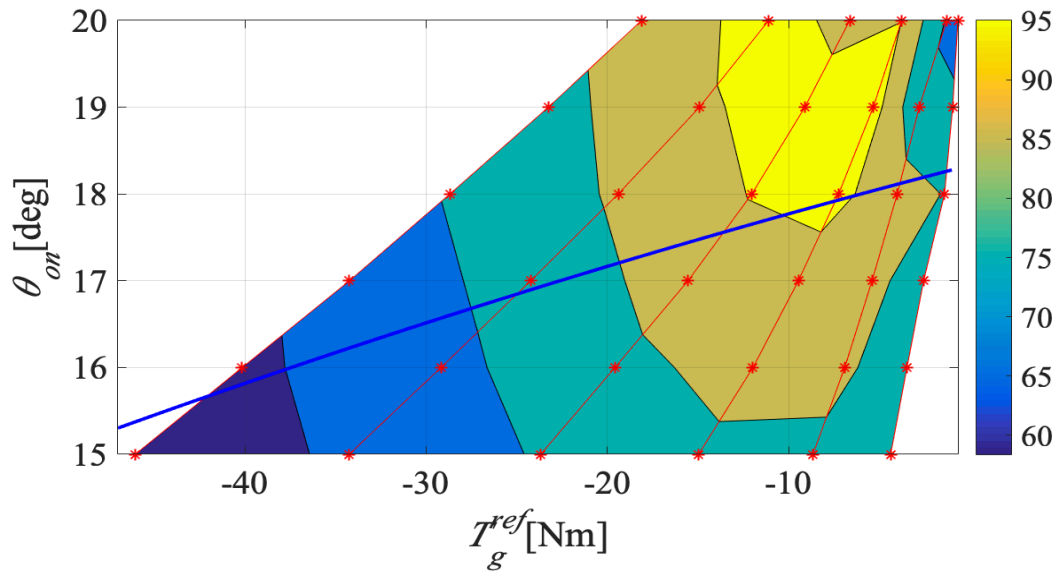
(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$



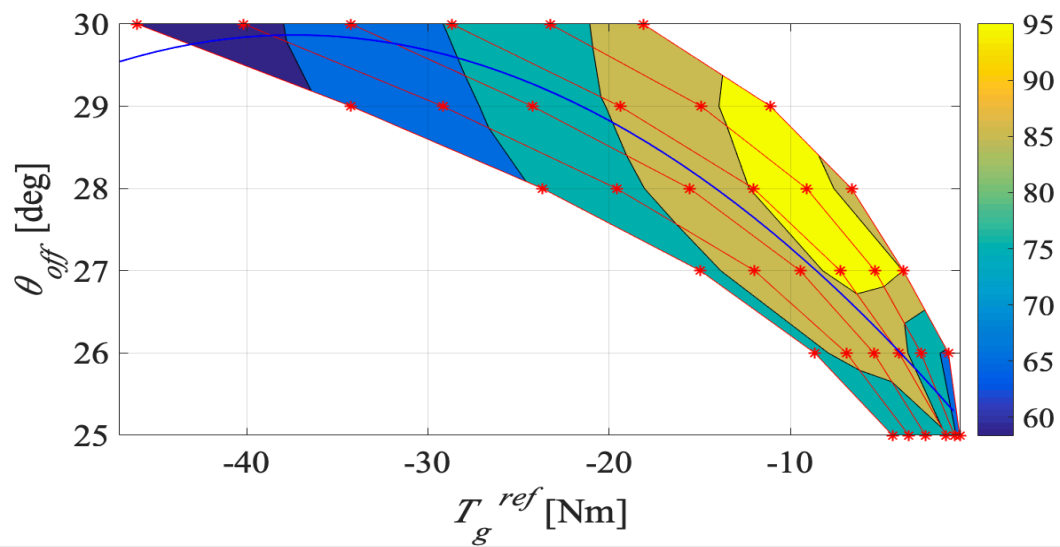
(b) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

図 4.33 900rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.33. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 900rpm.



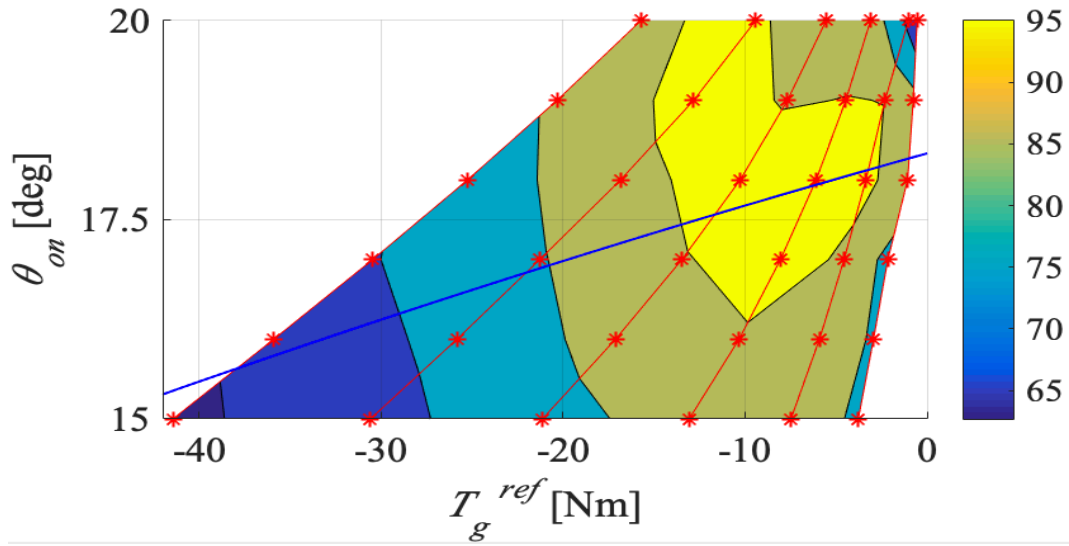
(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$



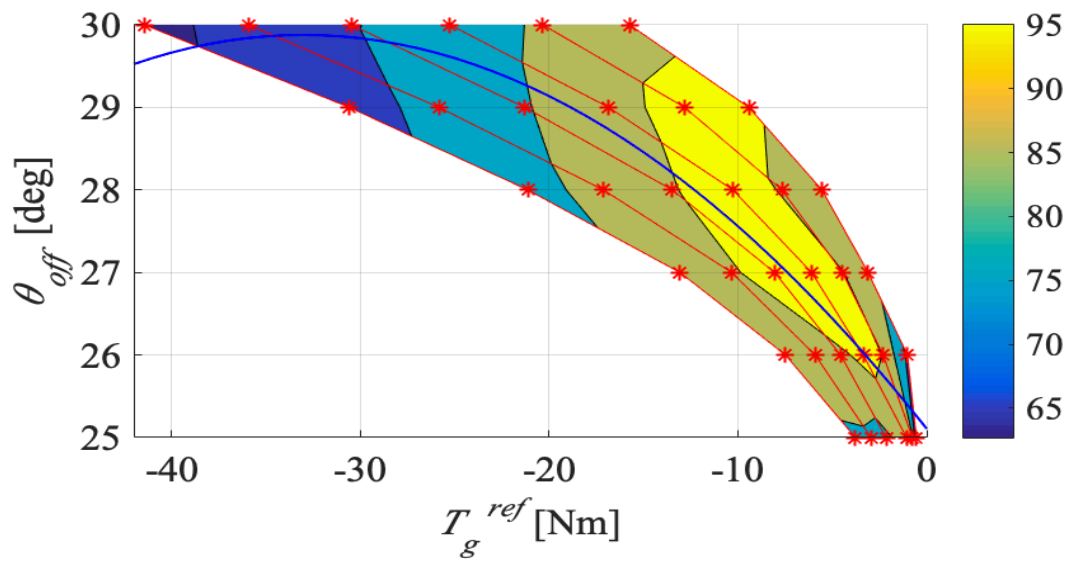
(b) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

図 4.34 1000rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.34. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 1000rpm.



(a) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$

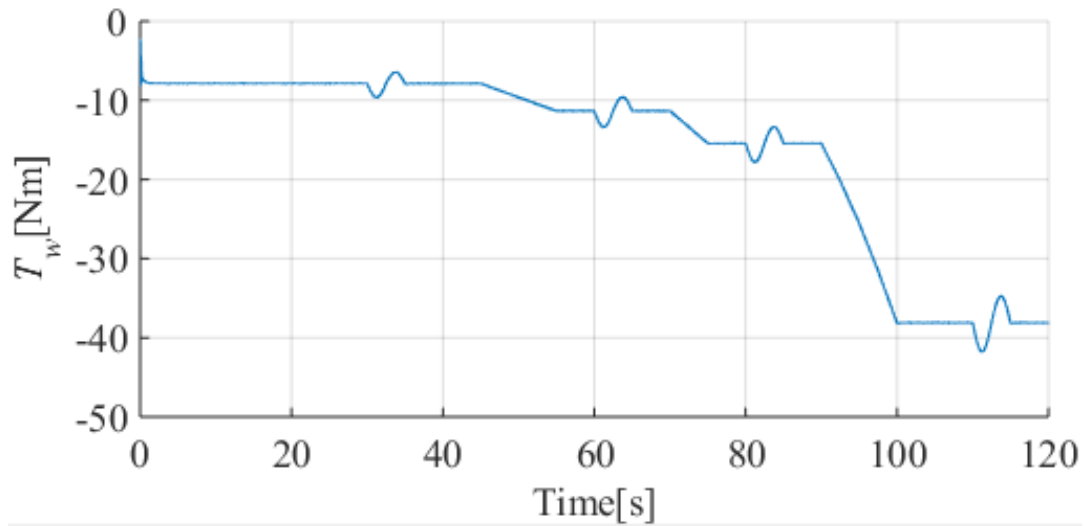


(b) Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{off}$

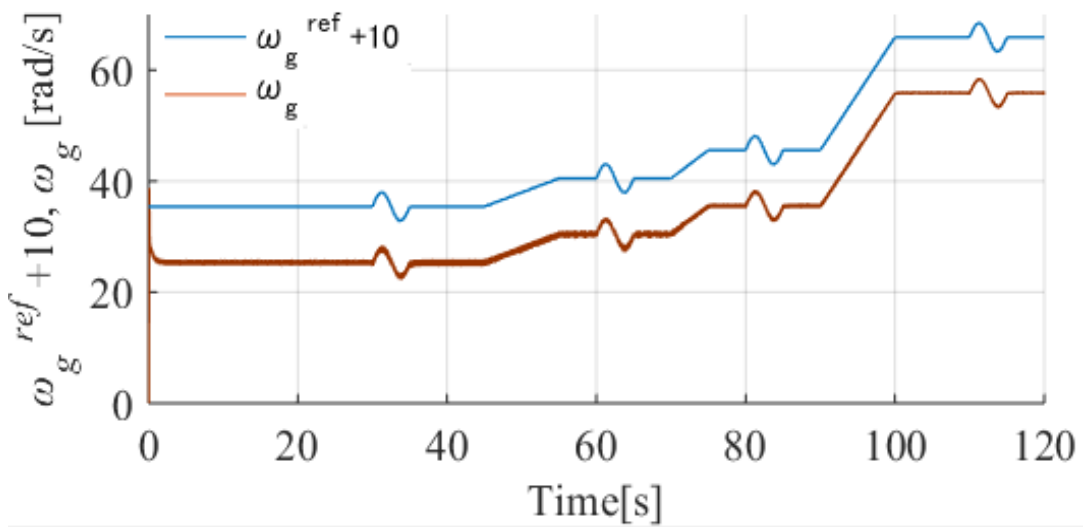
(4) 1100rpm

図 4.35 1100rpm の  $\theta_{on}$  と  $\theta_{off}$  のルックアップテーブルを準備するメカニズム

Fig.4.35. Mechanism preparing look-up table for  $\theta_{on}$  and  $\theta_{off}$  of 1100rpm.



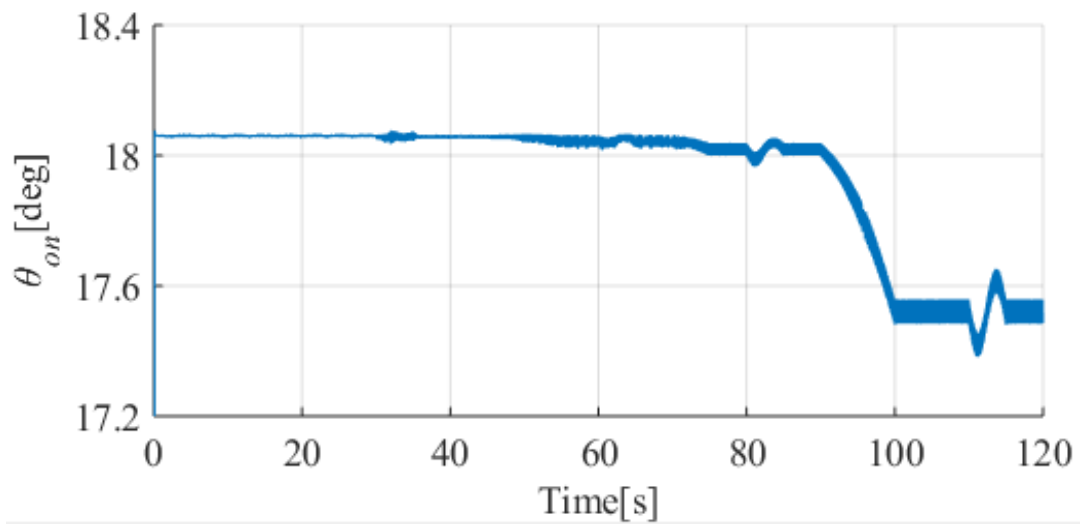
(a) Wind turbine torque  $T_w$



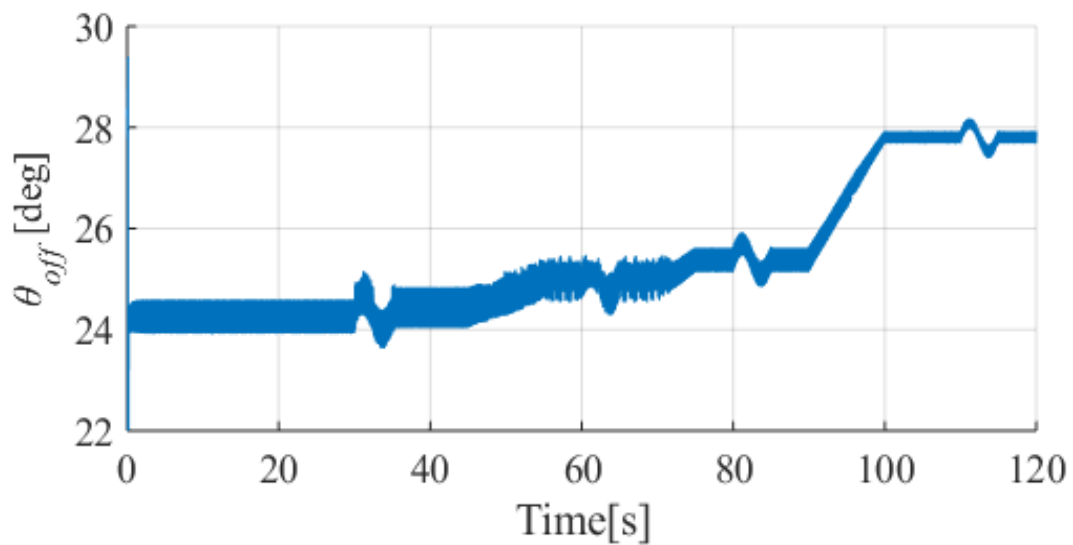
(b) WT speed reference  $\omega_g^{ref}$  and WT speed  $\omega_g$

図 4.36  $V_0$  に対する風車のトルクと回転角速度の結果

Fig.4.36. Torque and speed results of wind turbine for  $V_0$ .



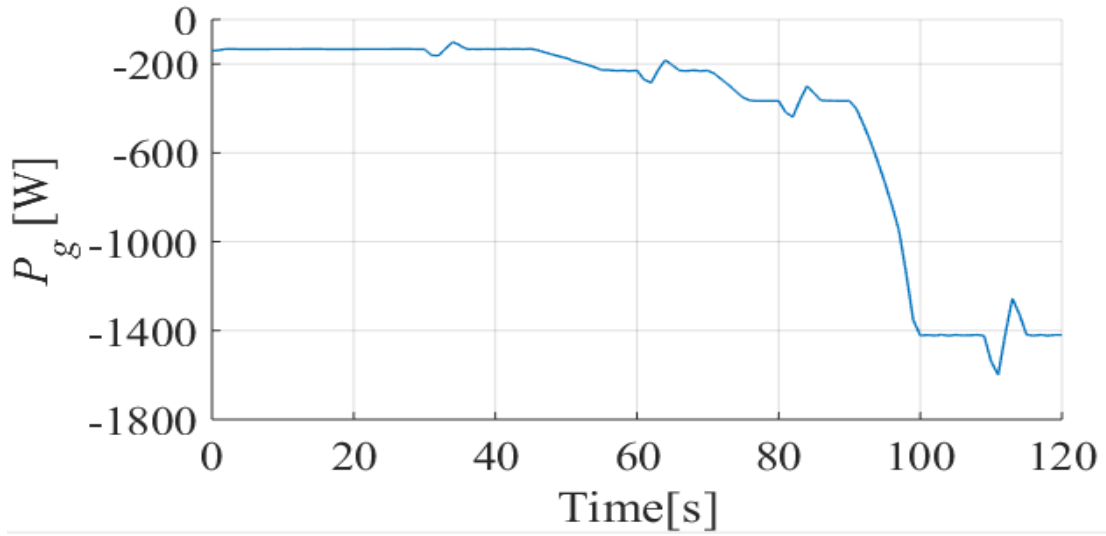
(c) turn-on angle  $\theta_{on}$



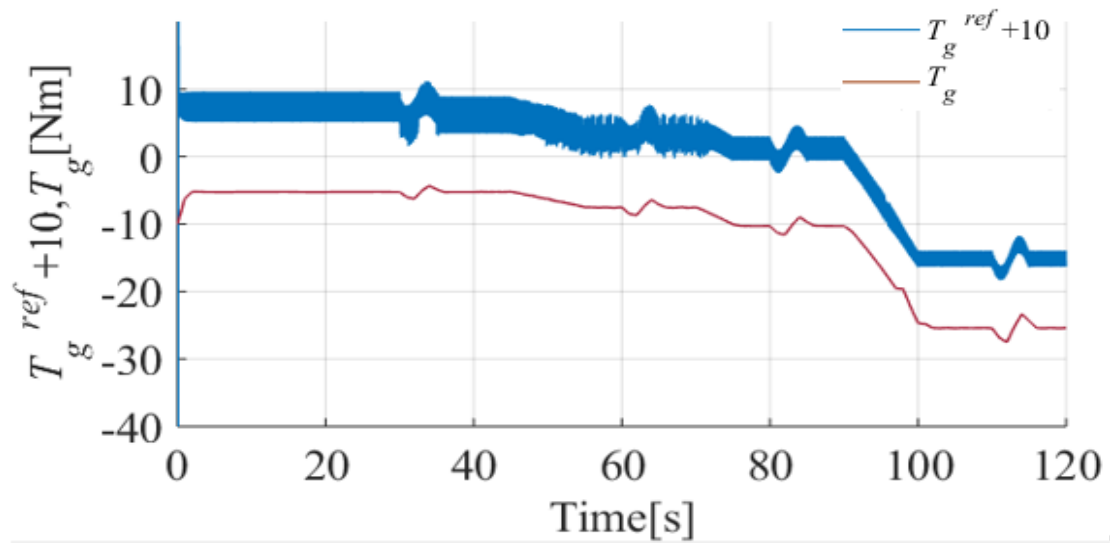
(d) turn-off angle  $\theta_{off}$

図 4.37  $V_0$  に対する VSWPGS の通電角の結果

Fig.4.37. Turn-on/off angle results of VSWPGS for  $V_0$ .



(e) Generated power  $P_g$

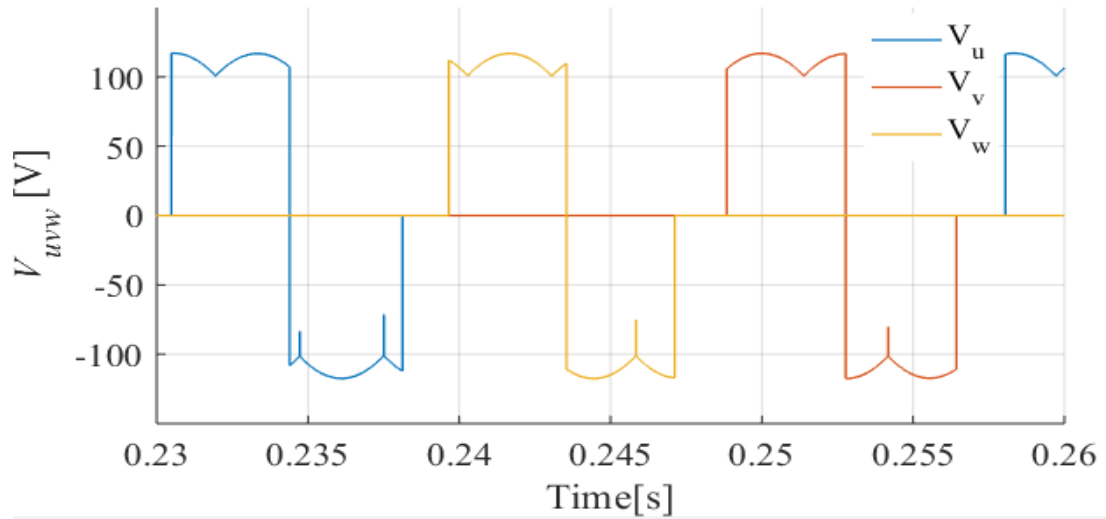


(f) SRG torque reference  $T_g^{ref}$  and SRG torque  $T_g$

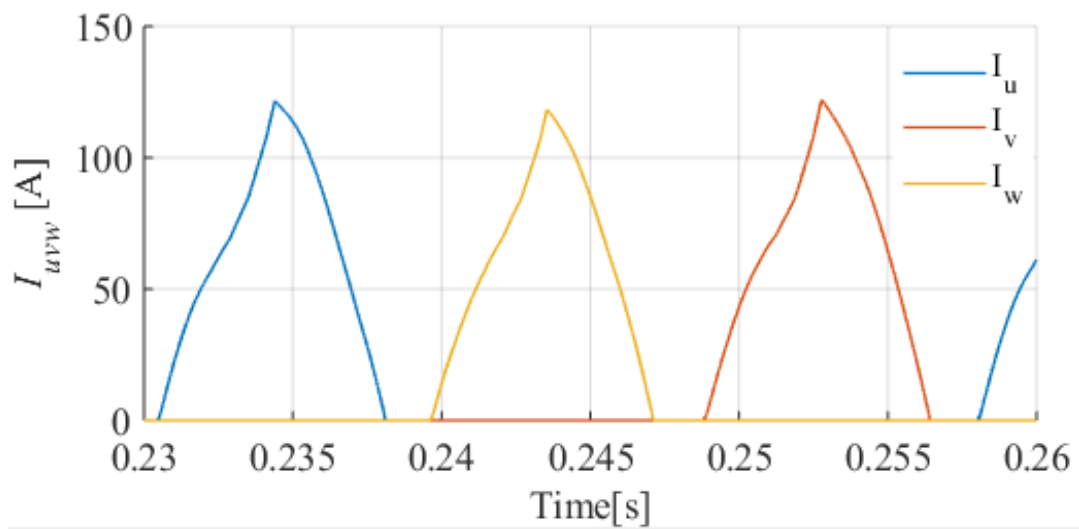
図 4.38  $V_0$  に対する VSWPGS のトルクと電力の結果

Fig.4.38. Torque and generated power results of VSWPGS for  $V_0$ .





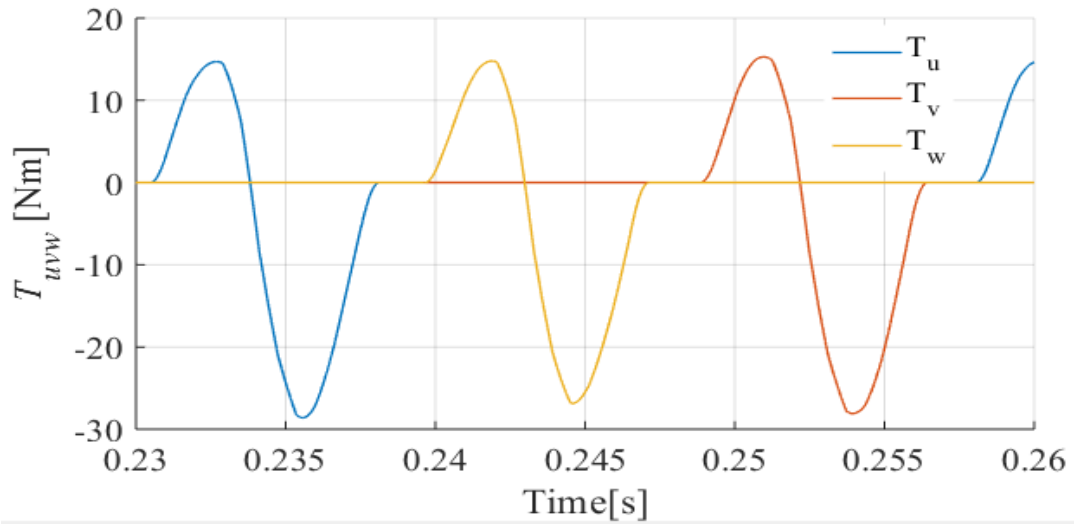
(a) Phase voltage  $v_u$ ,  $v_v$ , and  $v_w$



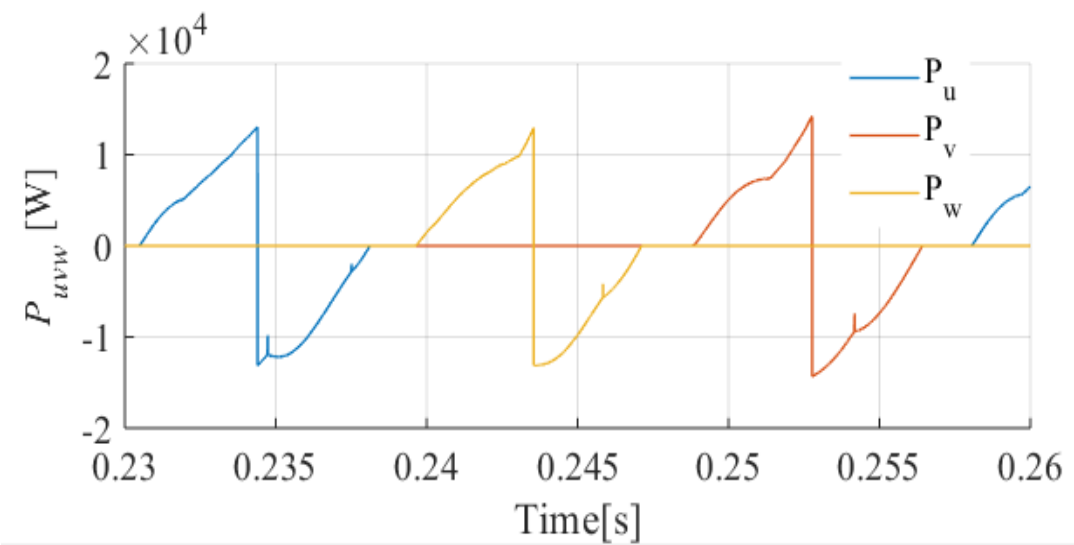
(b) Phase current  $i_u$ ,  $i_v$ , and  $i_w$

図 4.39 SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器の電圧と電流の結果

Fig.4.39. Voltage and current results of SRG and capacitor-less AC-AC converter.



(c) SRG torque  $T_u$ ,  $T_v$ , and  $T_w$



(d) Power for each phase  $P_u$ ,  $P_v$ , and  $P_w$

図 4.40 SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器のトルクと電力の結果

Fig.4.40. Torque and power results of SRG and capacitor-less AC-AC converter.

## 第五章 結論

### 5.1 本研究の成果

発電機としての SRG と系統連系インバータとしてのキャパシタレス AC-AC 変換器で構成される VSWPGS を提案し、その基本性能を検証するために Matlab/Simulink によるシミュレーションを行った。シミュレーションでは、翼素運動量理論に基づく風車(WT), WT・SRG・増速機を含む機械系, キャパシタレス AC-AC 変換器, そして制御システムの各モデルを考慮している。シミュレーション結果より, 提案方式において, キャパシタレス AC-AC 変換器が SRG を適切に励磁し, WT から得られる機械エネルギーを電気エネルギーに変換して系統側に逆潮流する系統連系インバータとして機能し, 更に VSWPGS に必要な可変速制御性能も具備していることを明らかにした。本方式は SRG を SRM として運転することが可能であり, 回生機能付き可変速 SRM ドライブにも適用できる。

### 5.2 今後の課題

今後は, 提案方式と従来方式 (非対称ハーフブリッジインバータ+PWM コンバータ) の実機試験を実施し, SRG や変換器などの各構成要素の電力損失や効率, 自然風に対する可変速性能, そして系統連系時の商用電源への影響を比較検討する予定である。

## 謝辞

本論文は、大山和宏教授の熱心なご指導の下で行なった「スイッチトリラクタンス発電機とキャパシタレス AC-AC 変換器による可変速風力発電システムの理論検証」の研究成果をまとめたものである。大山和宏教授には、研究に取り組む姿勢や課題に対する的確な助言、研究以外にも終始熱心にご指導頂き心よりお礼申し上げます。

情報通信工学科の前田洋教授、知能機械工学科の朱世杰教授、そして電子情報工学科の江口啓教授には、御多忙な中、本論文の副査を御引き受けくださり、御指導ならびに御鞭撻を頂きましたことを厚く御礼申し上げます。

また、一緒に楽しく充実した研究時間を過ごす本研究室の皆様に御礼申し上げます。

最後に、いつも私を支えてくれた両親に感謝の念を捧げます。

## 参考文献

- (1) 国連人口基金東京事務局：世界人口推移グラフ， <https://tokyo.unfpa.org>. (2020-8 確認)
- (2) BP 統計 2020, bp.com.(2020-12 確認)
- (3) Carbon Dioxide Information Analysis Center(CDIAC),“Global Fossil-Fuel Carbon Emissions”, [cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth\\_reg.html](https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth_reg.html) (2020-8 確認)
- (4) 気象庁「世界の年平均気温偏差」， <https://data.jma.go.jp>. (2020-12 確認)
- (5) OECD Nuclear Energy Agency, “Uranium 2018”, <https://www.oecd-nea.org>. (2020-12 確認)
- (6) International Energy Agency(IEA), “Data”, [iea.org](https://www.iea.org). (2020-8 確認)
- (7) 世界風力会議(GWEC), “GWEC GLOBAL WIND REPORT 2017”, [gwec.net/members-are-maker-intelligence/reports](https://www.gwec.net/members-are-maker-intelligence/reports). (2020-8 確認)
- (8) 牛山 泉:「風力発電発祥の地：ポール・ラグール博物館を訪ねて」， 風力エネルギー， Vol. 35, No. 3, pp. 68-73 (2011)
- (9) 安藤利昭・中村直貴：「日本の風力発電の現状からみる再生可能エネルギーの課程-再生可能エネルギーの主力電源化に向けて」， 立法と調査， Vol. 407, pp. 63-73 (2018-12)
- (10) 日本貿易振興機構：「ドイツの電力・エネルギー事情とビジネスチャンス」 (2012-5)
- (11) RED ELECTRICA DE ESPANA (REData), “The Spanish Electricity System 2015”, [https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/the\\_spanish\\_electricity\\_system\\_2015.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/the_spanish_electricity_system_2015.pdf). (2020-8 確認)
- (12) 新エネルギー・国際協力支援ユニット新エネルギーグループ：「インド：風力発電 60GW (2022)の導入に向けて新たな発展の道筋をも模索」， IEEJ, pp. 1-2 (2015-9)
- (13) 倪春春：「中国の風力発電政策と風力発電市場の動向」， The Institute of Energy Economics, Japan, pp. 1-22 (2008-7)
- (14) 一般社団法人日本小形風力発電協会：「小形風力導入手引書 第2版」 (2012-12)
- (15) 牛山 泉:「人と生活に優しい小型風車の意義」， 風力エネルギー， Vol. 32, No. 3, pp. 7-12 (2008)
- (16) 世界風力会議 (GWEC), “Global Wind Report”, <https://www.gwec.net/members-are-maker-intelligence/reports>. (2020-12 確認)
- (17) 飯田哲也：「自然エネルギー白書 2017」， 環境エネルギー政策研究所
- (18) 山本哲也， 小島大空， 山光史哲：「可変リアクトルを用いた三相かご形誘導発電機の

- 発電について」, 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, Vol. 2015, 01-2p-08, pp. 406-407 (2015)
- (19) Norimichi HORIUCHI, Takashi KAWAHITO, Takayuki SUZUKI: “Dynamic Characteristic Experiments of Variable Speed Wind Turbine Generator Using a Squirrel-cage Induction Generator”, Wind power energy, Vol. 26, No. 3, pp. 94-98 (2002) (in Japanese)
- 堀内紀充, 川人卓, 鈴木茂行: 「かご形誘導発電機を用いた可変速風力発電機の電力制御実験」, 風力エネルギー, Vol. 26, No. 3, pp. 94-98 (2002)
- (20) MI Yang, BAO Xiaowei, JIANG Enyu, DENG Weihua, LI Jianxin, WANG Limin, REN Lufei, WANG Peng: “The Pitch Angle Control of Squirrel-cage Induction Generator Wind Power Generation System Using Sliding Model Control”16<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (2014)
- (21) Helarisi Abeywardena, A. Atputharajah, J. B. Ekanayake: “Novel technique to smooth power output of a wound rotor induction generator based wind turbine”, 6<sup>th</sup> International Conference on Industrial and Information Systems, pp.517-521(2011-8)
- (22) Eiichi Sakasegawa, Takahiro Miyakawa, Kichiro Yamamoto, Katsuji Shinohara: “A Control Method of Wind Power System Using a Doubly Fed Wound Rotor Induction Generator and Suppression of Tower Shadow Effect”, 3<sup>rd</sup> International Conference on the Developments in Renewable Technology, pp.1-6(2014)
- (23) Xing-jia Yao, Shu Liu, Xiao-Dong Wang, Chang-Chun Gui, Zuo-Xia Xing, Hong-Liang Jiang: “Doubly-Fed Induction Generator Control for Variable-Speed Wind Power Generation System” International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 855-859 (2009-8)
- (24) R Basavaraja, J L Avinash, G R Poornima, K L Arun Kumar: “Performance Analysis of Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Power System”, 3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology, pp. 738-743 (2018-5)
- (25) Yunchong Wang, S. L. Ho, W. N. Fu, J. X. Shen: “A Novel Brushless Doubly Fed Generator Wind Power Generation”, IEEE Transactions on magnetics, pp. 4172-4175 (2012)
- (26) Yuehua Huang, Yang Xu, Xingchen Zhou, Bin Xu: “The Modeling Research on Brushless Double-fed Generator under No-load Condition for Wind Power Generation System” International Conference on Electric Information and Control Engineering (2011)
- (27) Sirichai Tammaruckwattana, Kazuhiro Ohyama, Chenxin Yue: “Experimental Assessment with Wind Turbine Emulator of Variable-Speed Wind Power Generation System using Boost

- Chopper Circuit of Permanent Magnet Synchronous Generator”, *Journal of Power Electronics*, JPE15-1-23, pp. 246-255 (2015)
- (28) Derong Luo, Yanzhao Sun, Shoudao Huang, Keyuan Huang: “Control of direct-drive permanent magnet Wind Power System Connected to Grid” *International Conference on Electric Machines and Systems*, pp. 2459-2463 (2011)
- (29) Mohammed Alnajjar, Dieter Gerling: “Six-phase electrically excited synchronous generator for More electric Aircraft”, *2016 International Symposium on Power Electrical Drives, Automation and Motion*, pp.7-13 (2016)
- (30) T.J.E Miller: “Electronic Control of Switched Reluctance Machines” [books.google.co.jp](http://books.google.co.jp). (2001)
- (31) Cameron D E, Lang J H: “The control of high-speed variable-reluctance generators in electric power systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.29, No.6, pp. 1106-1109 (1993)
- (32) Kjaer P C, Cossar C, Gribble J J: “Switched reluctance generator control using an inverse machine model”, *International Conference on Electrical Machines*, pp. 380-385 (1994)
- (33) Ferrira C A, Jones S R, Heglund W S: “Detailed design of a 30kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application”, *IEEE Transactions Industry Applications*, Vol.31, No.3, pp. 553-561 (1995)
- (34) Jones S R, B Drager T: “Sensorless switched reluctance starter/generator performance”, *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 3, No. 6, pp. 33-38 (1997)
- (35) Iordanis Kioskeridis, Christos Mademlis: “Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1062-1071 (2006)
- (36) Sawata T, Kjaer P C, Cossar C: “A study on operation under faults with the single-phase SR generator”, *IEEE Transactions Industry Applications*, Vol. 35, No. 4, pp. 782-789 (1999)
- (37) E. Mese, Y. Sozer, J.M. Kokernak, D.A Torrey: “Optimal Excitation of a High Speed Switched Reluctance Generator”, *Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 362-368 (2000)
- (38) Torrey D A: “Switched reluctance generators and their control”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 1, pp. 3-14 (2002)
- (39) S.Dixon, B. Fahimi: “Enhancement of output electric power in switched reluctance generators”, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 849-856 (2003)

- (40) Mademlis C, Kioskeridis I: “Optimizing performance in current -controlled switched reluctance generators”, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, No. 3, pp. 556-565 (2005)
- (41) Kioskeridis I, Mademlis C: “Optimal efficiency control of switched reluctance generator”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 4, pp. 1062-1072 (2006)
- (42) Yuan-Chih Chang, Chang-Ming Liaw: “On the design of power circuit and control scheme for switched reluctance generator”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 1, pp. 445-454 (2008)
- (43) Baiming Shao, Emadi A: “A digital control for switched reluctance generators”, IEEE International Conference on Mechatronics, pp. 182-187 (2011)
- (44) Narla S, Sozer Y, Husain I: “Switched reluctance generator controls for optimal power generation and battery charging”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 48, No. 5, pp. 1452-1459 (2012)
- (45) Xing Zhi, Duan Xiangjun, LiuLei: “MPPT for wind power system with switched reluctance generator”, 2018 13th IEEE Conference on an Industrial Electronics and Applications, pp.1421-1424 (2018)
- (46) Chao Liu, Y. Huo, Q. Wang: “Research on SR wind power system”, Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, pp.268-273 (2013)
- (47) Swagata Mapa, Ramkrishan Maheswari, G. Bhuvaneshwari: “Maximum Power Point Tracking Using a Novel Current Control Strategy in an SRG Based Variable Speed Wind Energy Conversion System”, 8<sup>th</sup> IEEE India International Conference on Power Electronics (2018)
- (48) Nakazawa Yoshihiro, Ohyama Kazuhiro, Nouzuka Kazuma, Fujii Hiroaki, Uehara Hitoshi, Hyakutake Yasushi: “Design Method for Improving Motor Efficiency of Switched Reluctance Motor”, *IEEJ Trans. IA*, Vol. 134, No. 7, pp. 656-666 (2014) (in Japanese)  
 中沢吉博, 大山和宏, 能塚和磨, 藤井裕昭, 上原一士, 百武康: 「スイッチトリラクタンスモータのモータ効率を向上させる設計法」, 電学論 D, Vol. 134, No. 7, pp. 656-666 (2014)
- (49) パワーエレクトロニクス: 「マトリクスコンバータの基本構造」, [energychord.com/children/energy/pe/inv/contents/inv\\_matrix\\_fund.html](http://energychord.com/children/energy/pe/inv/contents/inv_matrix_fund.html). (2020-8 確認)
- (50) Sirichai Tammaruckwattana, Chenxin Yue, Yumi Ikeda, Kazuhiro Ohyama: “Comparison of switching losses of matrix converters for commutation methods”, 2014 16<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications, (2014)



- (51) N Burany: “SAFE CONTROL OF FOUR-QUADRANT SWITCHES”, Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual meeting, pp. 1190-1194 (1989)
- (52) NEDO : 風力発電導入ガイドブック (2008年2月改訂第9版) , nedo.go.jp. (2020-8 確認)
- (53) J.M.Jonkman: “Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST\_AD”, NREL/TP-500-34755 (2003). <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34755.pdf>

# 研究業績

## 査読付論文

- (1) 吉 古元・大山和宏：「スイッチトリラクタンス発電機とキャパシタレス AC-AC 変換器による可変速風力発電システムのシミュレーション」, 電気学会論文誌 D, 141 巻, 2 号, pp. 185-192 (2021)

## 国際会議

- (1) Guyuan Ji, Kazuhiro Ohyama : “Simulation of Variable Speed Wind Power Generation System Using Switched Reluctance Generator and Capacitor-less AC-AC converter” 7<sup>th</sup> International Symposium on Energy 2017 (口頭, 査読無)
- (2) Guyuan Ji, Kazuhiro Ohyama : “Simulation of Wind Power Generation System Using Switched Reluctance Generator and Capacitor-less AC-AC converter” International Power Electronics Conference, pp.2921-2926, 2018 (口頭, 査読有り)
- (3) Guyuan Ji, Kazuhiro Ohyama : “The application of an AC-AC converter to a wind power generation system with a switched reluctance generator” International Conference on Sustainable Energy and Green Technology, pp11-14, 2018 (ポスター, 査読有り)
- (4) Guyuan Ji, Kazuhiro Ohyama : “MPPT Control of Variable Speed Wind Power Generation System Using Switched Reluctance Generator and Capacitor-less AC-AC converter” The 23<sup>rd</sup> International Conference on Electrical Machines and System, pp.1012-1016, 2020 (口頭, 査読有り)

## 国内会議 :

- (1) 吉 古元・大山和宏：「スイッチトリラクタンス発電機を用いた風力発電システムのシミュレーション」, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Y-117 (2016)
- (2) 吉 古元・大山和宏：「キャパシタレス AC-AC 変換器を用いる SR 発電機の発電特性への励磁方法の影響」, 2019 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Y59 (2019)
- (3) 吉 古元・大山和宏：「キャパシタレス AC-AC 変換器による SRM 可変速制御システム」, 2020 年電気学会九州支部連合大会, 03-1A-05, pp. 26 (2020)

国内研究会：

- (1) 吉 古元・大山和宏：「スイッチトリラクタンス発電機とキャパシタレス AC-AC 直接変換器による可変速風力発電システムのシミュレーション」，産業応用部門モータドライブ研究会，MD-16-102，pp.27-31（2016）
- (2) 吉 古元・大山和宏：「キャパシタレス AC-AC による SRM 可変速制御システムの 4 象限運転」，磁気支持・リニアモータ・磁性材料・モータドライブ一般，MD-20-164，pp.47-51（2020）

その他の国内発表論文：

- (1) 吉 古元，楊欣，大山和宏：「風力発電用スイッチトリラクタンス発電機のインダクタンス曲線と発電効率の関係に対する考察」福岡工業大学エレクトロニクス研究所報 34，pp. 35-40（2017）