

論文の内容の要旨

氏名：直井和久

専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：直線翼式垂直軸風車における起動性の向上に関する研究

再生可能エネルギーによる発電は地球温暖化の主因とされる二酸化炭素の排出量が少ないことや、化石資源の使用を抑制できるなどの利点から着目されている。一方、自然条件に左右されるため、発電が不安定でコストが高いなどの欠点があり、今日、広く普及しているとはいえない。風力発電のコストは、再生可能エネルギーの中でも比較的優れており、離島など燃料の運搬が困難な場所では経済的なメリットがあると考えられる。

風力発電では風力エネルギーを動力に変換するために風車が利用される。回転軸の方向によって風車は水平軸風車と垂直軸風車に分類される。また、回転原理によって風車は主に翼の揚力を利用する高速回転、低トルクかつ高効率の揚力形と主に翼の抗力を利用する低速回転、高トルクかつ低効率の抗力形に分類される。発電装置に利用する場合、効率の優れている方が出力は大きく有利なため、揚力形を採用するケースが多い。揚力形風車は効率特性に優れているが、低トルクのため起動性に劣るという特徴をもつ。

離島などでは風の方向や強さが激しく変動する場合があります。水平軸風車では翼の方向やピッチ角の制御が追いつかず破損することもある。垂直軸風車は風向に依存しないため、このような場所に設置すると有利である。本研究では垂直軸風車の中でも効率の点から有利な揚力形の直線翼式垂直軸風車の起動性について検討する。この風車の翼には潮流発電用タービンで使用実績のあるNACA63₃-018翼型を基にキャンバー線を風車の回転軌跡と一致するようにした円弧キャンバー翼を用いた。円弧キャンバー翼はキャンバー線が直線の翼型よりも効率特性に優れた翼型である。

揚力形風車における起動性の改善方法として、直線翼式垂直軸風車では以下の方法が提案されている。しかし、それぞれ起動に伴う欠点を併せ持っている。起動時に発電機を電動機として駆動させる方法では、駆動用電力を確保する必要がある。翼の取付角度を制御する方法では、風の方向や強さが激しく変動する場所に設置すると、翼の支持部を可動させるため破損の原因になると考えられる。抗力形のサボニウス風車と揚力形の直線翼式垂直軸風車の回転軸を機械的に結合しハイブリッド風車として利用する方法では、2つの風車が1本の回転軸を共有するため、直線翼式垂直軸風車の場合と比較して出力が低下する。

本研究では直線翼式垂直軸風車の起動性を向上させることを目的として翼枚数、取付角度および補助翼に着目し、これらが風車特性に及ぼす影響について検討する。

本論文は次の第1章から第5章より構成した。

第1章「序論」では、本研究の背景および目的を示した。また、既往研究について述べ、本研究の位置づけを示した。

第2章「翼枚数による起動性の向上」では、風車の翼枚数が起動性に与える影響について検討する。一般に風車の翼枚数と起動性については、回転円周に対して翼のそり線の長さの占める割合（ソリディティ）と関係がある。翼枚数の増加によりソリディティが大きくなると起動トルクは増加し起動性は良くなるが効率は低くなるとされている。しかし、翼枚数の変化に対して起動トルク特性や起動風速がどのような関係となるかは報告されていない。そこで、本章では風車の翼枚数が起動性に与える影響について、起動トルク特性および起動風速から検討する。また、風車の寸法が起動性に与える影響について寸法の異なる2種類の風車、D600×H450風車とD1600×H1600風車により検討する。さらに、風車の特性としては風力エネルギーを機械エネルギーに変換する効率、すなわち風車効率が重要であり、この検討のために風車回転時の負荷特性について検討する。

D600×H450風車を用いて翼枚数1～6枚の場合について検討したところ、起動トルク特性試験から平均起動トルクが最大となる翼枚数は6枚翼、効率が最高となる翼枚数は3枚翼であった。すなわち、起動性を重視すれば翼枚数を多くした方が良く、効率を重視すると翼枚数を少なくした方が良いという結果が得られ、起動性と効率は翼枚数に対して相反する関係になることを示した。また、風車の起動トルクと起動風速についてD600×H450風車とD1600×H1600風車を用いて翼枚数3、4枚について検討した。風車寸法に関わらず4枚翼風車の方が起動トルクは大きく、起動風速は低くなることを示

した。また、D1600×H1600風車の4枚翼風車では起動風速は4～9 m/sであり、風力発電装置の設置目安とされる年間平均風速は7 m/s以上であることを考慮すると実用上問題ないと考えられる。ここで、4枚翼風車は起動トルクは負とならず、効率は3枚翼風車よりも劣るが翼枚数5枚以上の場合よりも高い効率となり有利である。また、4枚翼風車は負荷特性においてトルクが負となる回転速度が存在するが、その範囲は狭く、風速の増加にともないトルクは正となる。したがって、4枚翼風車は起動性と効率の点から優れていることを示した。

第3章「翼取付角度による起動性の向上」では、風車の翼取付角度が起動性に与える影響について検討する。翼取付角度により風車出力は変化するため、プロペラ風車においてはピッチ角制御が広く利用されているが、本研究のように風の方向や強さが激しく変動し、翼取付角度の制御が追いつかないような場合、翼取付角度を一定とすれば装置の耐久性や導入コストなどの点から有利となる。直線翼式垂直軸風車における翼取付角度と風車特性の関係については関らにより翼取付角度と風車効率についての報告があるが、本論文で目的としている起動性との関係については述べられていない。また、これら報告にはTWT系列の翼型が用いられており、本研究の直線翼式垂直軸風車に用いるNACA63₃-018に基づいた円弧キャンバー翼については明らかにされていない。このため、本章では円弧キャンバー翼を利用した直線翼式垂直軸風車において、翼取付角度が起動性に及ぼす影響について検討する。また、負荷特性試験により翼取付角度と風車効率の関係についても検討する。

取付角度を-6～+90 degの範囲に設定し検討し、次の結果が得られた。起動トルクは取付角度が正のとき増加し、その平均値は取付角度60 degにおいて最大となることを示した。しかし、負荷特性試験から翼取付角度を正にすると、効率は取付角度0 degよりも著しく低下する。すなわち、起動トルクは取付角度が正のとき増加し、効率は取付角度が負のとき改善することから、翼取付角度に対して起動性と効率は相反する関係にあることを示した。ここで、広い回転速度域で高い効率となる取付角度は-4 degである。取付角度を-4 degとした場合、起動トルクが負となる位置角は20～30 degの範囲と狭く、この位置角の起動トルクは風速の増加にともない正となる。したがって、取付角度を-4 degとすれば効率に優れ、起動性に及ぼす悪い影響も少ないと考えられる。以上のことから、起動性と効率の両面を考慮して取付角度は0 degとするか、ある程度の起動性を犠牲にして効率を優先し取付角度は-4 degとすることが考えられる。

第4章「補助翼による起動性の向上」では、風車の翼枚数や翼取付角度に依らない起動性の改善方法として、補助翼の利用を提案する。直線翼式垂直軸風車において、補助翼は強風時に風車が高速回転になり破損するのを防止するために用いられることはあるが、本研究のように風車の起動性を向上させることを目的として補助翼を利用する場合については検討されてない。そこで、本章では風車の起動性を向上させるため、補助翼が風車の起動トルク特性および起動風速に及ぼす影響を検討し、次の結果が得られた。

翼が風向に対して迎角150～270 degに位置するとき、固定角補助翼により起動トルクは増加し、迎角0～30, 270～360 degに位置するとき、固定角補助翼により起動トルクは減少する。補助翼により風車の起動トルクを増加させるには、翼が風向に対して迎角150～270 degに位置するとき補助翼が開いた状態となり、翼が迎角0～30, 270～360 degに位置するとき補助翼が閉じた状態となる必要があることを明らかにした。このような開閉状態を実現するため、開閉する機構をそなえたHおよびR方式の開閉式補助翼を試作し、2～4枚翼風車に取り付けた。開閉式補助翼により起動トルクは増加し、トルクが負となる位置角も存在しなくなった。また、2～4枚翼のD600×H450風車に開閉式補助翼を取り付けた場合、起動風速は補助翼を取り付けない場合と比較して最大で9 m/s低下し、4枚翼風車において最低起動風速7～8 m/sとなった。風力発電装置の設置目安とされる年間平均風速は7 m/s以上であることを考慮すると、開閉式補助翼により起動風速が実用上問題のない風速まで低下できる可能性があることを示した。

第5章「結論」では、第2～3章において検討した風車の翼枚数および翼取付角度により起動性の向上を図る場合、風車効率の低下などの問題点があることを指摘した。第4章において提案した開閉式補助翼により、今後、風車効率を落とさずに風車の起動性を向上することが可能であるとの見通しを示した。また、本研究で試作した開閉式補助翼の構造では補助翼を取り付けない場合よりも風車効率は低下することが推察され、今後は開閉式補助翼が負荷特性に及ぼす影響を明らかにする必要があることを述べた。