

# 風力発電

I. 風力発電

II. 交流系統との一般的連系法

III. 特性

# I. 風力発電

## 1. 発電の原理

風の運動エネルギーが風力タービンのブレードを回転させ、それが軸を通して発電機を回転させる。

風力は間歇的であり負荷には追従せず、変動が大きく、また場所に大きく依存する。

風力タービンの理論的出力は次のようにして得られる。

断面積  $a$ 、空気密度  $\rho$ 、速度  $V$  のとき、運動エネルギーは、

$$w = C_p \frac{1}{2} m V^2 = C_p \frac{1}{2} (\rho a V t) V^2$$

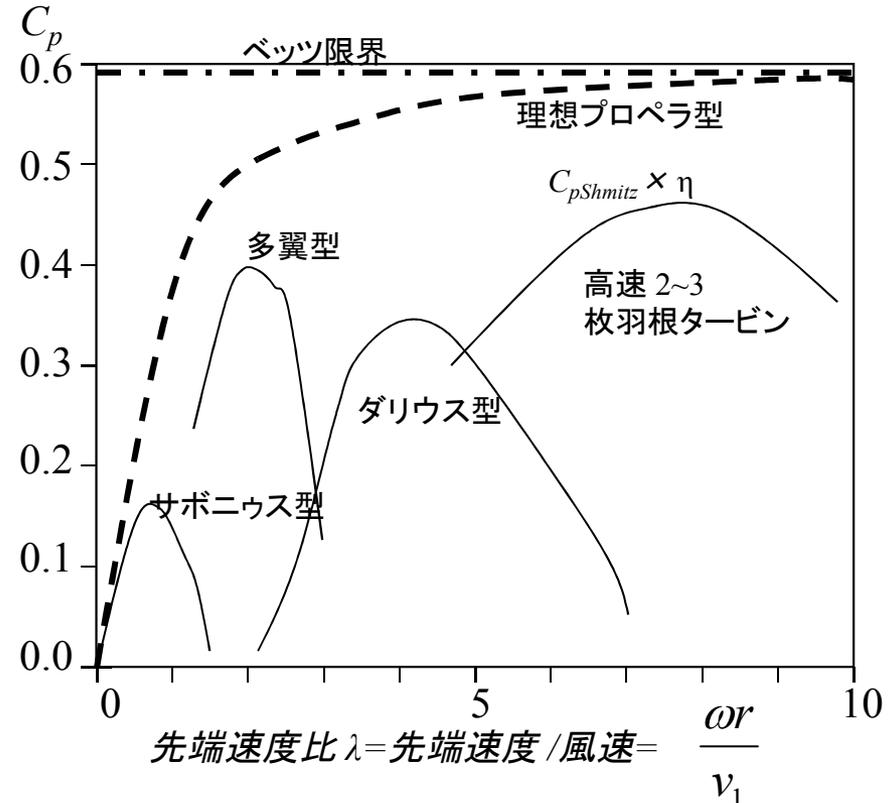
$$= \frac{C_p}{2} \rho a V^3 t,$$

したがって電力  $p$  は、

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{C_p}{2} \rho a V^3$$

出力係数  $C_p$  はプロペラー型で、

$$\frac{16}{27} = 0.593 \text{ (ベッツ限界) を超えない。}$$



推定賦存量 風力 14TW, 潮汐 0.7TW, 地熱 1.9TW, バイオマス 5~7TW, 水力 0.6TW

需給ギャップ 14TW 2050まで, 33TW 2100年まで

参照 Arthur Nozik, NREL and Kristoph Brabec Konarke, thru Joel Kubby :”太陽からのパワー” Wikipedia

## 2. 空気力学

$\rho$ : 空気密度、 $A$ : 面積、 $\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho A_n v_n$

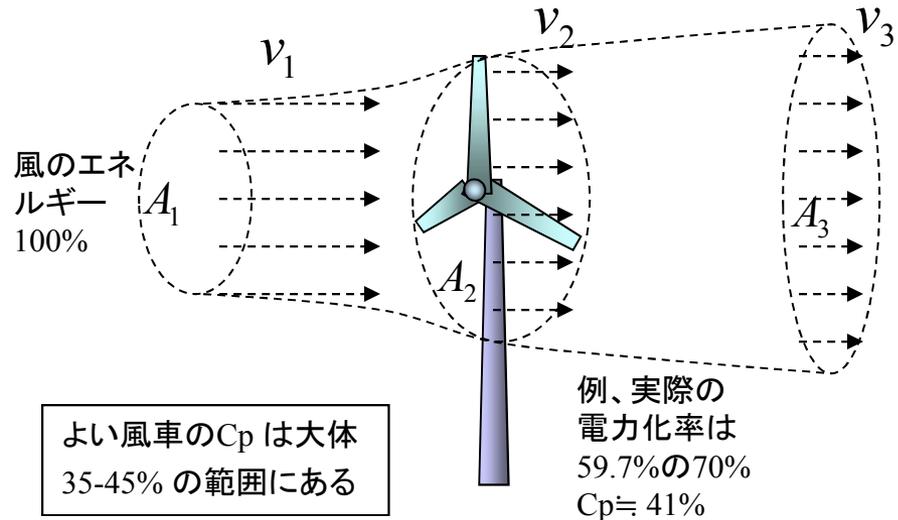
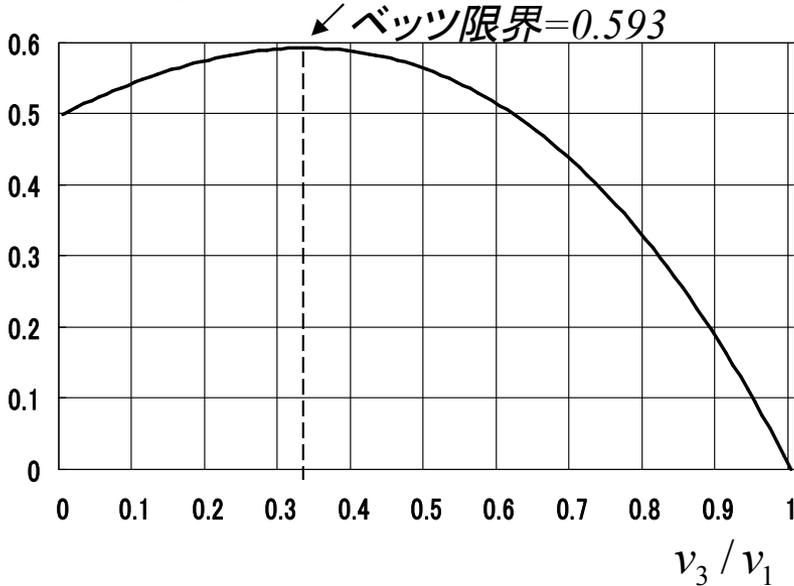
$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = A_3 v_3, f_2 = \Delta p A_2 = \dot{m} v_1 - \dot{m} v_3$$

$$P_2 = \frac{\dot{m}}{2} (v_1^2 - v_3^2) = \Delta p A_2 \frac{v_1 + v_3}{2} = \Delta p A_2 v_2$$

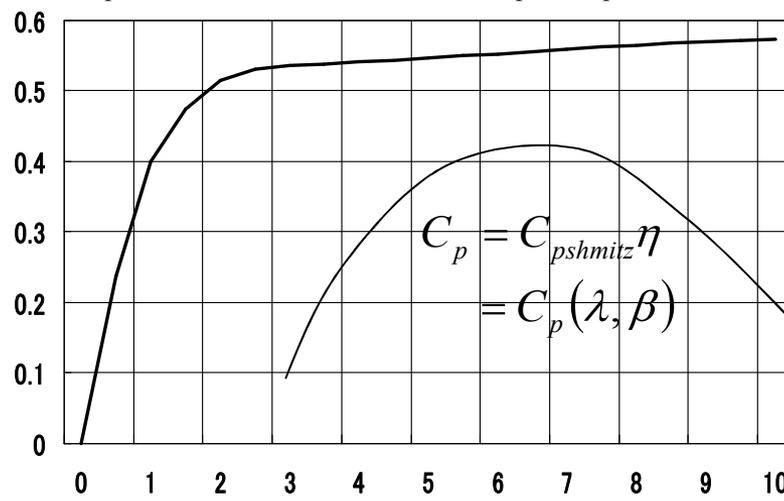
$$\therefore v_2 = (v_1 + v_3) / 2,$$

$$C_p = (\rho A_1 v_1^3 - \rho A_3 v_3^3) / \rho A_2 v_1^3$$

$$C_p = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left( \frac{v_3}{v_1} \right) - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^3 \right\}$$



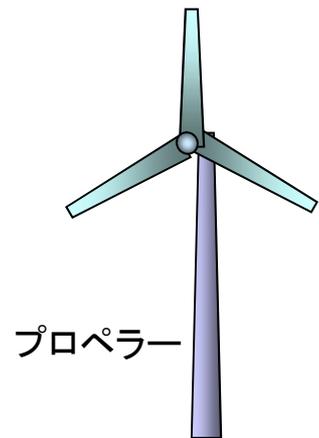
$$C_{pShmitz} = \text{ベッツ限界} \times C_{pWhirl pool}$$



風のエネルギーの 40.7% は使えない

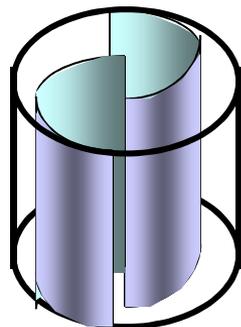
$$\lambda = \frac{\omega r}{v_1}$$

### 3. 風車の種類

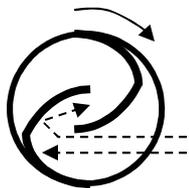


プロペラー

風車



サボニウス型



水平軸

垂直軸

揚力型

抗力型

揚力型

抗力型

プロペラ型

高速、高性能

多翼型

壁

低速

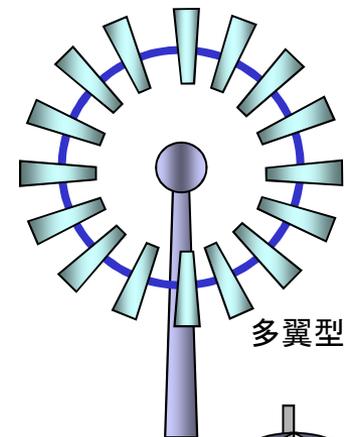
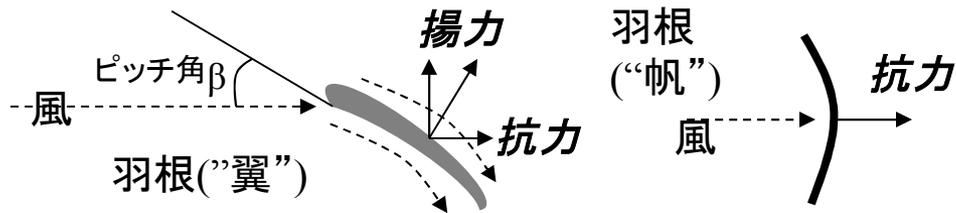
多翼型2

ダリウス型

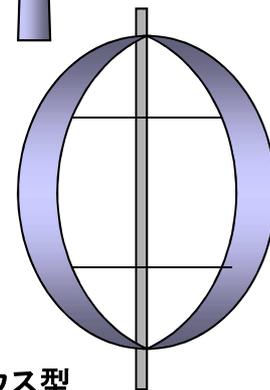
高速、高性能  
無指向性

サボニウス型

高トルク、低速  
高信頼度



多翼型1

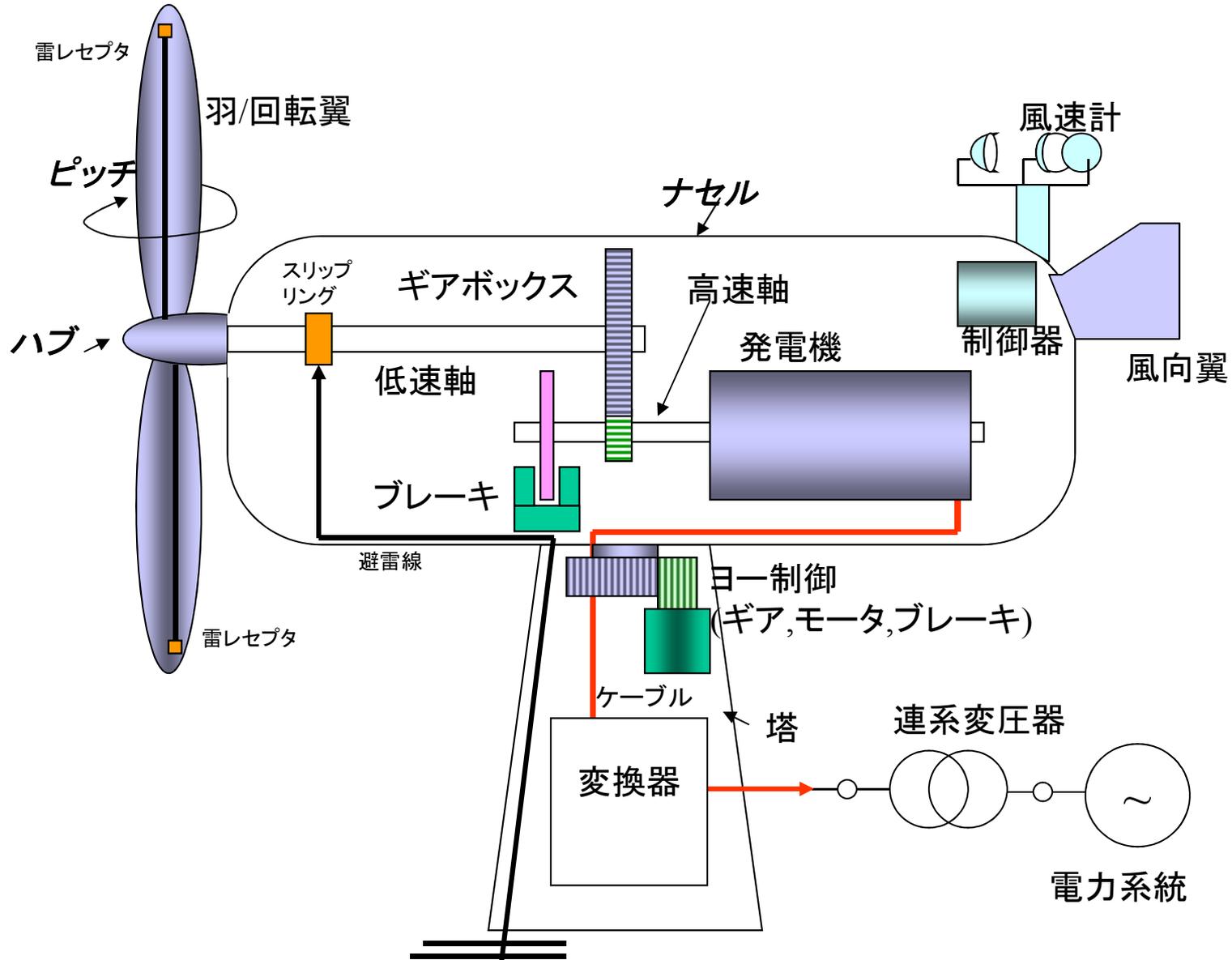


ダリウス型

## 4. 風車の特性

1. 風車とは風の運動エネルギーを機械的エネルギーに変換する装置である。
2. 風力は間歇的で、変動し易く、場所に依存する。言い方を換えれば負荷需要には従わない（風速分布はワイブル分布がよく適合する。P.10）
3. 風車には運転可能な風速の範囲があり、この範囲外では回転しないか停止させる
4. 設備利用率は約 20~40%である。すなわち、1kWの風力発電は、年間1800~3600kWhを発電する。
5. 風により回転速度が変化するので、誘導発電機、または、周波数変換器付きの同期発電機が使用される。
6. 大型の発電機用には、通常、プロペラ型やダリウス型が用いられる。
7. 研究報告によれば、隣接する風車との間隔はロータ直径の15~25倍が適当。
8. 単機出力は、1kW~4MWで、10MW のものも研究されている。

# 5.プロペラ型風力発電の構成



## II. 交流系統との一般的連系法

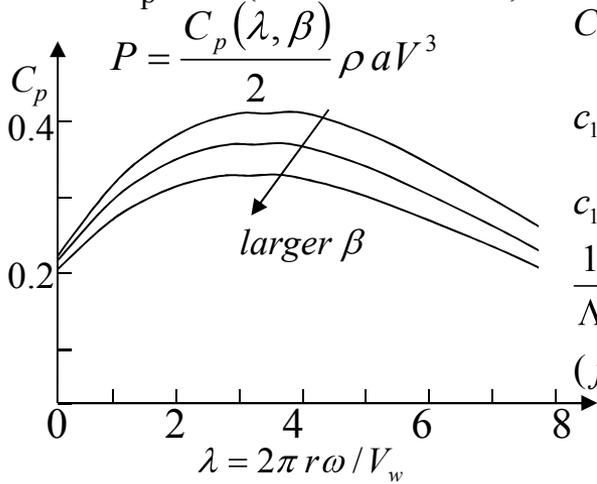
交流連系型	1	巻線型誘導発電機。 周波数変換器により回転部の周波数と系統周波数間の変換が行われる。	<p>超同期セルビウス制御</p> <p>巻線型 IG</p> <p>ギア</p> <p>周波数変換器</p> <p>AC/DC</p> <p>DC/AC</p> <p>連系変圧器</p> <p>電力系統</p>
	2	巻線型誘導発電機。 ソフトスタータにより励磁突入電流が抑制される。	<p>巻線型 IG</p> <p>制御器</p> <p>ソフトスタータ</p> <p>連系変圧器</p> <p>電力系統</p>
	3	かご型誘導発電機。 ソフトスタータにより励磁突入電流が抑制される。	<p>かご型 IG</p> <p>ソフトスタータ</p> <p>連系変圧器</p> <p>電力系統</p>
直流連系型	4	同期発電機。 回転数に応じた周波数が系統周波数に変換される。	<p>同期発電機</p> <p>励磁回路</p> <p>AVR</p> <p>周波数変換器</p> <p>AC/DC</p> <p>DC/AC</p> <p>連系変圧器</p> <p>電力系統</p>

## 系統接続面から見た特徴

発電方式		突入電流	力率制御	出力変動
交流連系型	1	同期並列により ほぼ 0	可能	可変速システムのため比較的小
	2	ソフトスタータに より 0	不可能 無効電力は系 統から発電機 に吸収される	可変速システムのため比較的小
	3	ソフトスタータに より 0	不可能 無効電力は系 統から発電機 に吸収される	すべり速度は出力に比例するため比較的大
直流連系型	4	同期並列により ほぼ 0	可能	可変速システムのため比較的小

# III. 特性

## 1. $C_p$ 対 $\lambda$ (先端速度比)



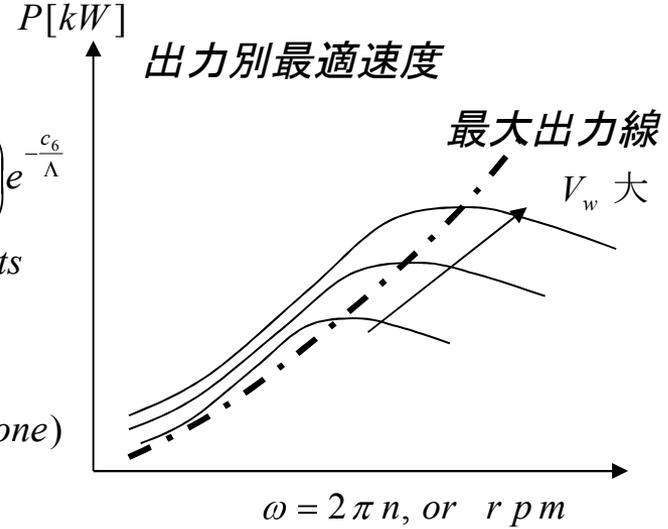
$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\Lambda} - c_3 \beta - c_4 \beta^x - c_5 \right) e^{-\frac{c_6}{\Lambda}}$$

$c_1 \sim c_6, x$  are coefficients

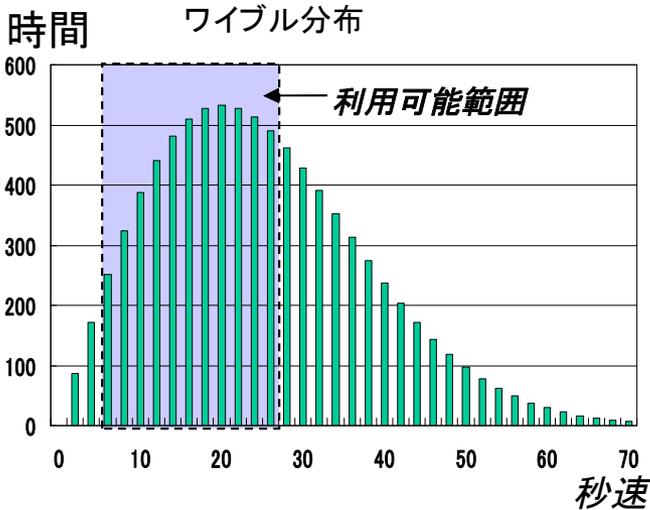
$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.35}{1 + \beta^3}$$

(from NI Developer zone)

## 2. 出力 / 回転速度.(MPPT)



## 3. 風速分布



$$f(x) = \begin{cases} \alpha \beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^\beta} & \text{for } x > 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

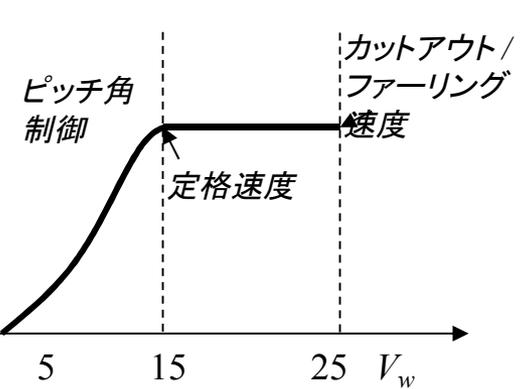
$$F(x) = 1 - e^{-\alpha x^\beta}$$

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)} = e^{\alpha x^\beta}$$

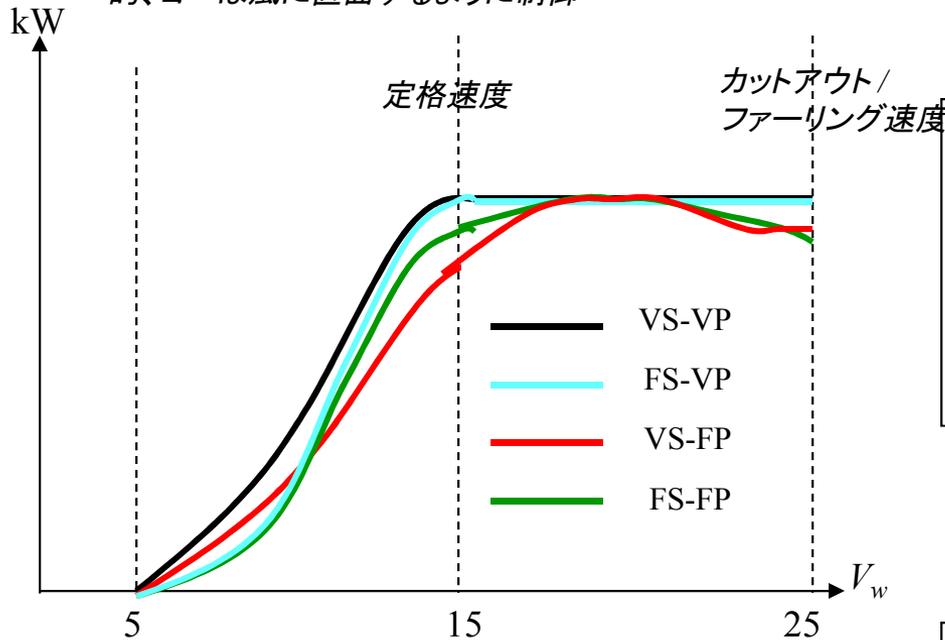
$$\ln T(x) = \alpha x^\beta$$

$$\ln \ln T(x) = \ln \alpha + \beta \ln x$$

## 4. 速度制限



制御方法による出力曲線 (可変速可変ピッチ角が理想的、ヨーは風に直面するように制御)



**ピッチ角制御はブレード角を回転速度、出力最適化する**

**ピッチ制御で回転を止めるには**

- ① ストローリング:  $\beta=90$ 度にする。
- ② ファールディング:  $\beta=0$ 度にする。

風速が大きいときはピッチ角調整が最適

**カットアウト制御オプション:**

- ① ブレーキ+ブレードを風に平行にする ( $\beta \rightarrow 0$ ).
- ② タービンを後傾、または前傾
- ③ タービンを空気力学および重力で風を受けない位置に制御 ('autofurl')
- ④ 空気ブレーキにより一定出力になるよう制御
- ⑤ ブレードを風に平行にし ( $\beta \rightarrow 0$ ) 減速

**ヨー制御は**

- ① 通常運転時には有効ロータ面積Aを確保するため風に直面させる
- ② 風速が大きいとき回転速度を安全な範囲に保持するよう数度調整
- ③ 風速が過酷な条件では風に90度の位置で停止させる。

### 3. 制御装置

#### (1) MPPT

type1: 風速に応じた最適回転速度が計算される。電力系統側の同期速度とローター 回転速度との差の周波数(すべり)が周波数変換器から供給される。

ピッチ角はすべての型で制御される。

type2: 二次回路の抵抗が速度により変えられる。

type4: ロータ回転に見合う周波数が周波数変換器から供給される。

type3: 風速に応じて回転速度が変化する。

#### (2) 逆変換器

##### 変調度

変調度は AC 電圧に比例 → AC電圧の調整には変調度を変える。

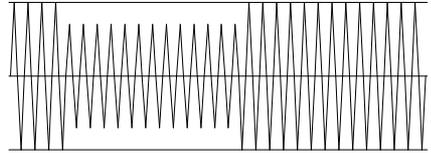
##### 位相角

位相角の増加は AC 出力を増加させる。

他励式の場合、通常 AC 出力目標は風力出力の瞬時値に合わせる。

#### (3) 保護装置(経産省ガイドライン,次ページ参照)

## 送配電線に接続される風力発電にかかわる問題点

影響範囲	予想される問題	解決法
ローカル系統(配電、送電系統)	流入電力による電圧変動	1) 入力電力の制限 2) 力率制御の付加 3) 系統側での電圧制御
	上位系統事故による瞬時電圧低下時の発電機脱落	fault ride through (FRT) 機能の付与 (例.70%電圧で, 250msの電圧低下で脱落しない)
	単独運転	単独運転検出機能の付与
系統全体 (太陽光や風力の比率が非常に大きいとき)	周波数調整能力の不足	蓄電能力の付与
	上位系統事故による瞬時電圧低下時の発電機脱落による供給力不足	FRT及び蓄電能力の付与 

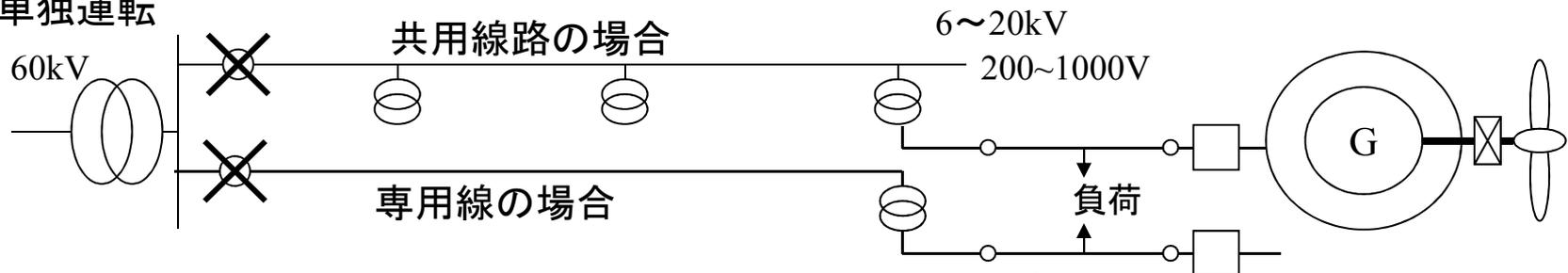
## 保護装置の例(経産省ガイドライン)

接続システム	出力	逆潮流の有無	保護継電装置								
			OCR/O CGR	OVR/ UVR	OVGR	高低圧 混触	OFR	UFR	RPR	転送とリッ プまたは OFR	充電電流 検出
低圧配電線	50kW 未満	あり	○	○	-	○	○	○	-	○	-
		なし	○	○	-	○	-	○	○	-	○
高圧配電線	2000kW 未満	あり	○	○	○	-	○	○	-	○	-
		なし	○	○	○	-	-	○	-	-	-
目的			局所事 故検出	発電機 事故	地絡事 故	高電圧か らの保護	単独運転	単独運転	単独運転	単独運転	逆充電
○: 要 -: 不要											

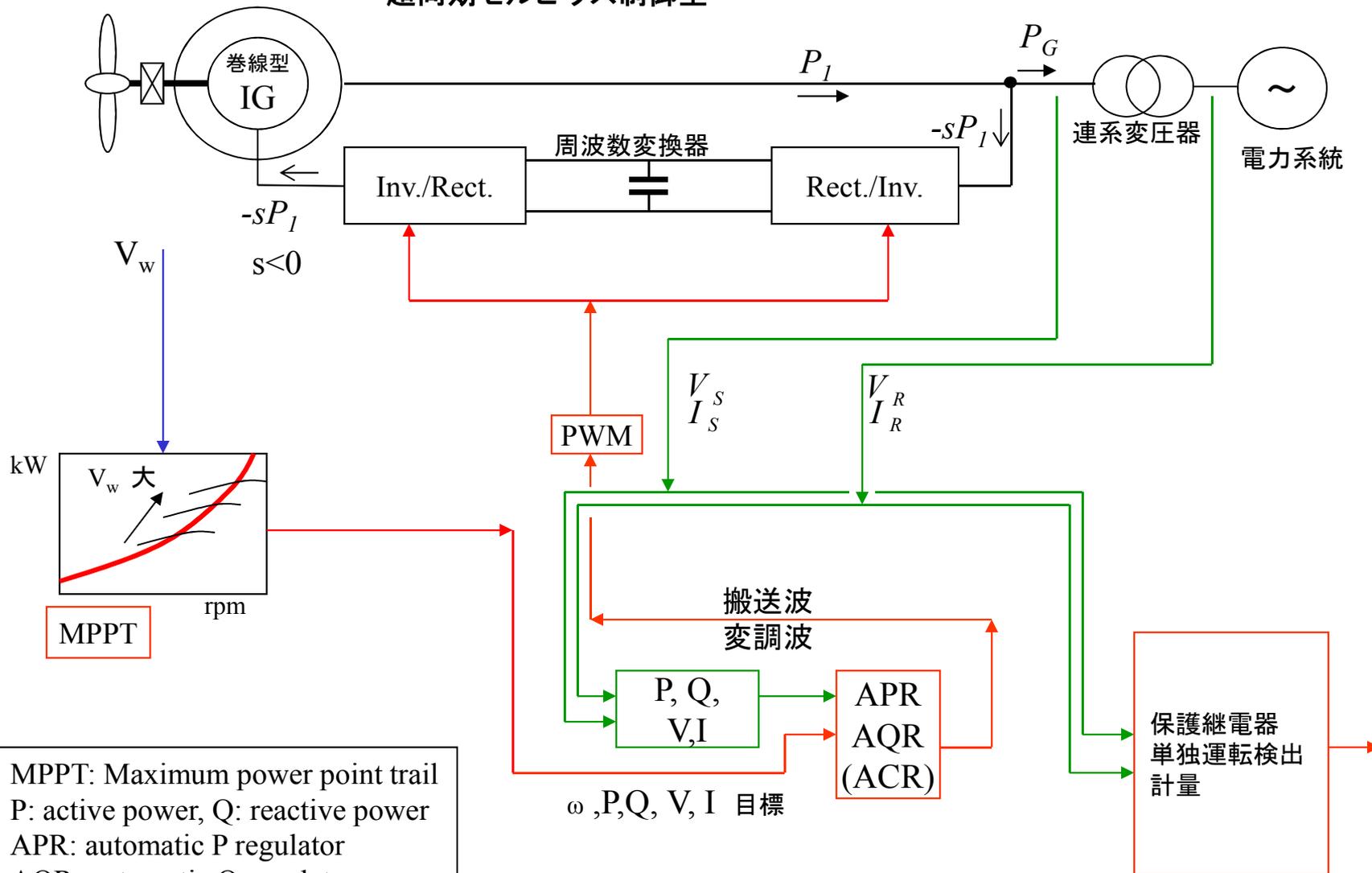
# 単独運転検出法 (連系されている送配電線が電源側で遮断された場合)

単独運転検出		単独運転開始時の事象
受動的方 法	力率の飛躍	力率が系統力率から負荷力率に変化
	第3高調波の急変	電流制御式変換器の場合変圧器の例;電流が電流が歪み波から正弦波に変化
	周波数変化率	逆変換器出力と負荷の差から周波数が変化
能動的方 法	周波数偏移	周波数発生器に予めセットされた周波数偏移が出現
	有効電力変動	逆変換器出力に予めセットされた出力変動が電圧、電流、周波数に周期的変動を起こす。
	無効電力返送	逆変換器出力に予めセットされた無効電力変動が電圧、電流、周波数に周期的変動を起こす。
	負荷変動	周期的負荷インピーダンス挿入が電流分布に周期的変化をもたらす。

## 単独運転

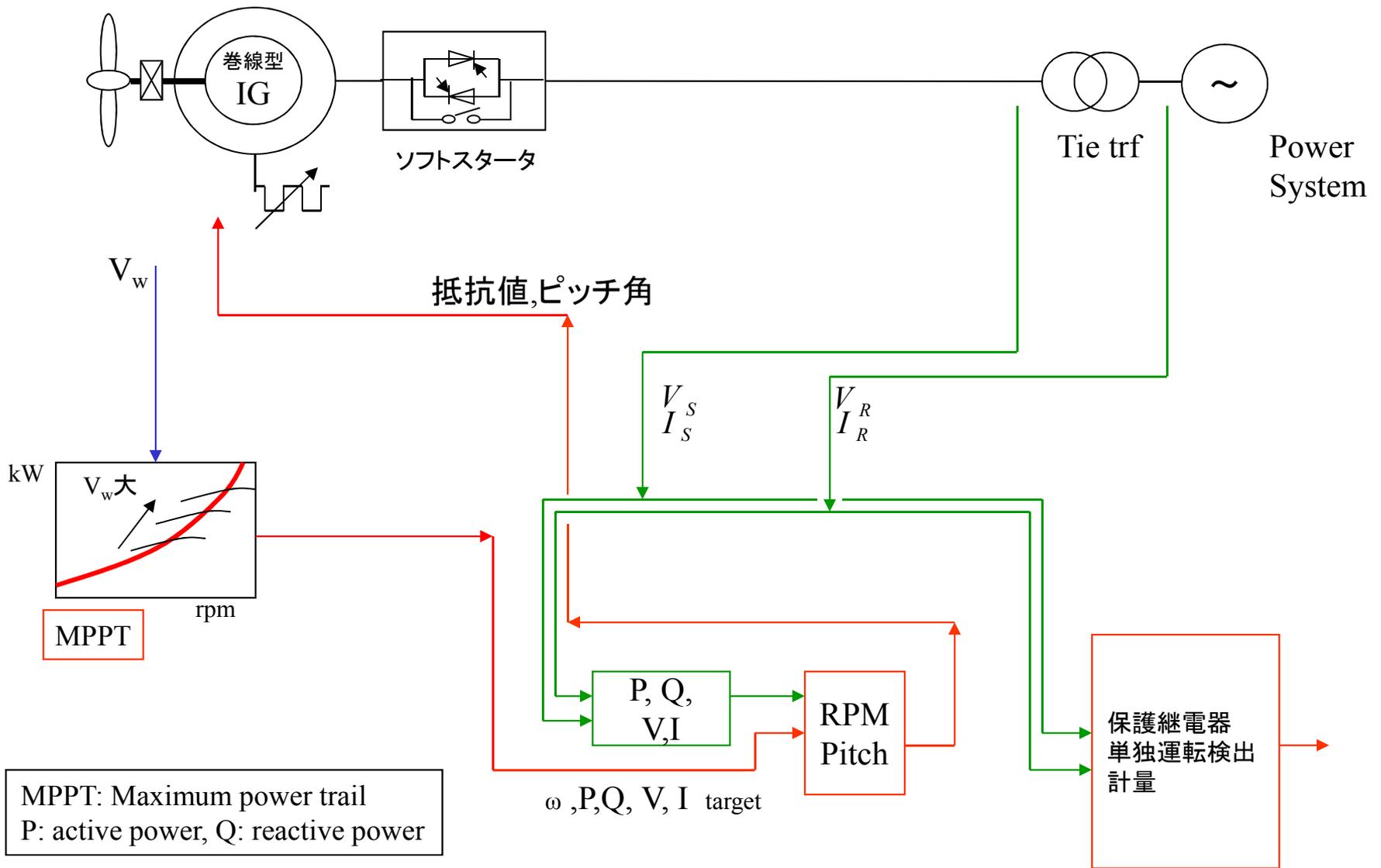


# 超同期セルビウス制御型



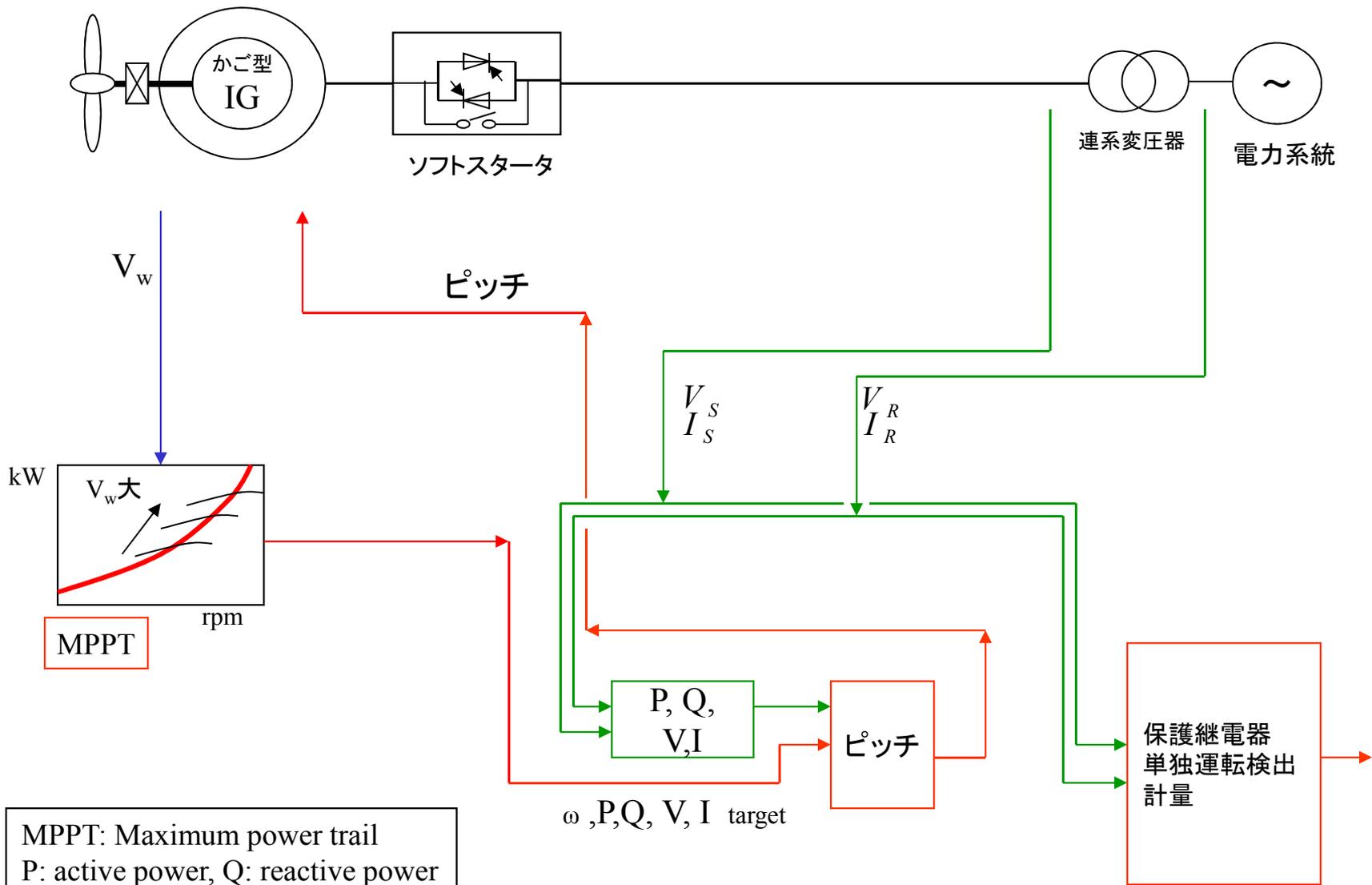
MPPT: Maximum power point trail  
 P: active power, Q: reactive power  
 APR: automatic P regulator  
 AQR: automatic Q regulator  
 ACR: automatic current regulator  
 PWM: pulse width modulation

## 制御システムの例



### 制御システムの例

MPPT: Maximum power trail  
 P: active power, Q: reactive power



制御システムの例

