

あわら北潟風力発電所 4号風車ブレード折損事故 (第2報)

前回(第1報)は事故の発生状況について速報した。今回は、その後の調査で判明した事故のメカニズム、事故原因と再発防止策等について報告することとしたい。

0. 前回報告

● 事故の状況

2015年12月17日21時18分頃、4号風車で2本のブレードが、根元約5mを残して折損し、1本が脱落。

● 事故時の運転状況

風速10~15m/s、発電出力1,300~2,000kWで運転中に3枚の翼のピッチ制御システムで、電源異常(欠相)を検出。これによりピッチを90°(風車停止)に制御するよう、風車の制御システムがピッチ制御システムに対して指令を出す。ピッチが応答せず運転を継続。その後の風速の上昇に伴い過回転が発生した。コンバータ保護回路により負荷遮断が発生し、さらに過回転が増大。その後2番翼、3番翼、1番翼でピッチが動作した。

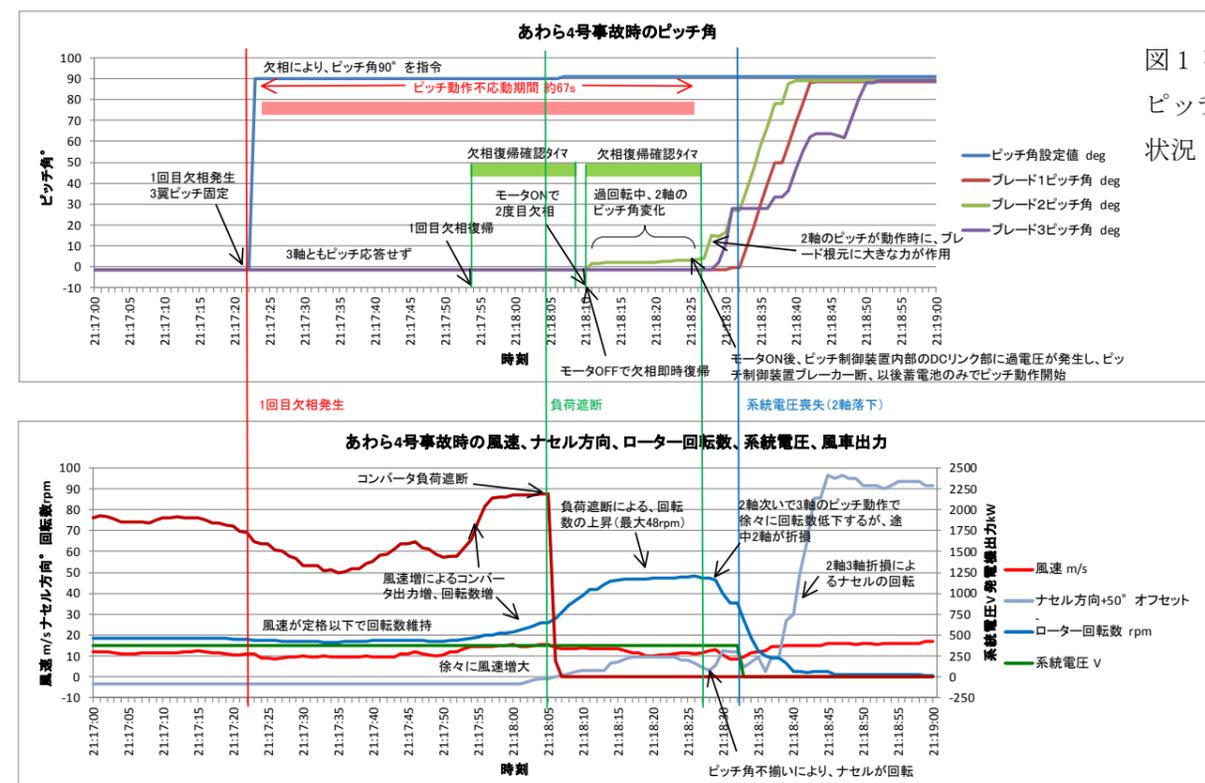
● ピッチ制御プログラムの問題

ピッチ制御プログラム(Ver3.5.8)には、AC230V電源回路欠相時にピッチ制御が不動作となる不具合があることは、ピッチ制御システムメーカー(デンマーク Mita Teknik 社)が確認しており、事故後に行われた風車メーカーの社内試験でも再現された。

1. 過回転の発生とブレード折損のメカニズム

1.1 運転記録の分析

事故時のピッチの挙動とローター回転数、発電機出力等の関係を図1で説明する。



断続的に検出した電源異常(欠相)によって、3翼のピッチが67s間不動作になった(その間に風速が上昇し過回転が発生した)。1度目の欠相検出から復帰した際は、すぐに再度欠相が検出されピッチが停止したが、2度目の欠相検出から復帰後、ピッチモーターが回転した際に、ピッチ制御装置内のDCリンク部に過電圧が発生しピッチ制御用交流電源が切り離され、以後蓄電池によりピッチが動作した。その途中で第2軸の根元に大きなモーメントが作用し折損したとみられる。

1.2 シミュレーションによる解析

過回転時のピッチ動作でブレードの根元に加わる応力を解析した結果を以下に示す。本解析では、図1で記録された風速、負荷遮断、ピッチやナセルの挙動を考慮している。解析の結果、第2軸と第3軸で設計荷重を40%程度上回るモーメントが作用することが確認された。

なおピッチが動作しない状態の解析では、事故時の風速12m/s前後で48rpm程度に回転数が上昇し、実測と一致した。その際ブレード基部には設計値を上回るモーメントは発生しなかった。

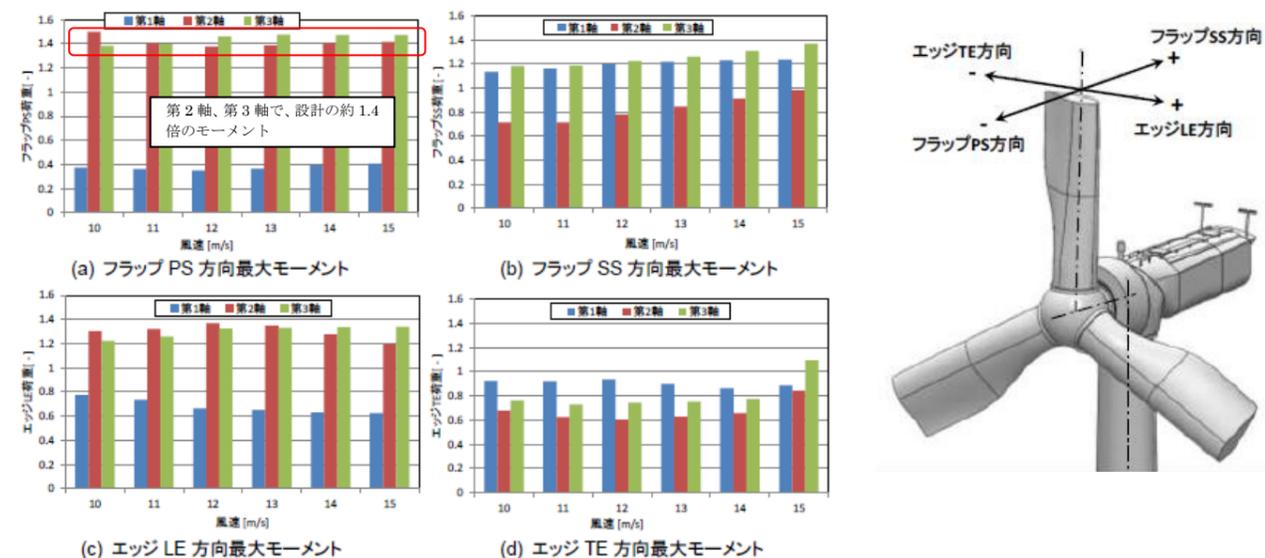


図2の解析ケースにおけるブレードの基部に加わる荷重の時間変化と、長手方向の作用力に対するブレードの断面の設計強度の分布を図3に示す。第2軸のみ根元から4.2mで、作用力が設計強度を上回っており(作用力に対する設計強度の比が1を下回っている)、損傷する可能性があるという結果となった。第1軸、第3軸では作用力に対する設計強度の比は全領域で1を上回っており損傷に至らない。このため、最初に第2軸が根元から約4.2mの部分で折損し、これが第3軸に衝突して第3軸が折損したものと判断される。

なお、これら解析結果は、破損したブレードの状態とも一致するものである。

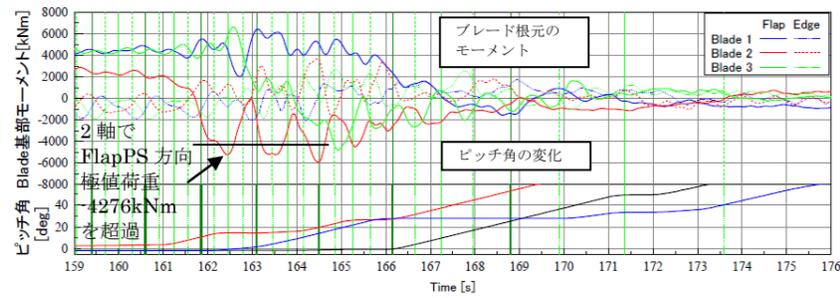


図3 ブレード基部に加わるモーメントの時間変化とブレード長手方向の損傷位置解析

これらの解析結果から、事故時のブレード折損、飛散の状況を推定したものが図4である。本検討により、今回のブレードの折損は、3軸ピッチ固定による過回転が発生した状態で、90°方向にピッチが緊急停止制御されたことで、第2軸の4.2m位置前後でブレードが折れ、これが第3軸に衝突して第2軸の脱落と第3軸の折損に至ったものと想定される。またブレードの強度については、設計通りの強度を有しており、過回転後のピッチ制御で第2軸に許容荷重異常の荷重が加わったことで、折損に至ったものと判断される。

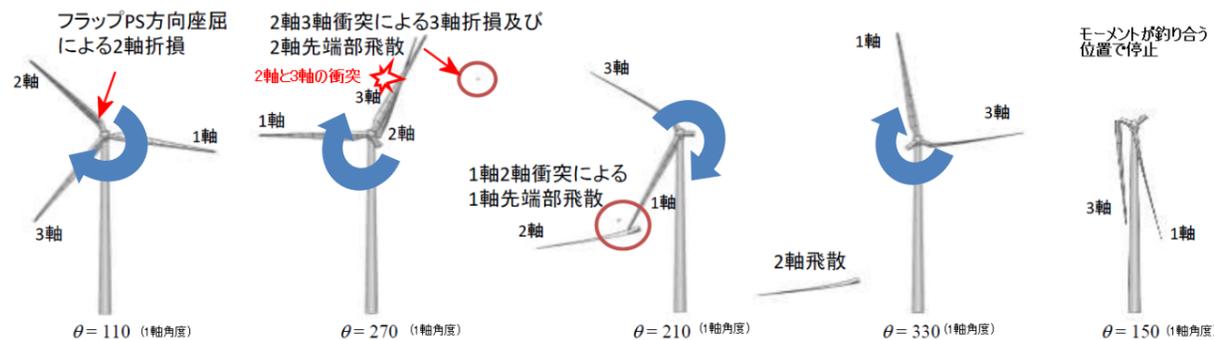


図4 ブレード折損、飛散の状況の推定

2. 事故要因

2.1 電源異常の発生（端子台接触不良と欠相検出）

今回事故の発端となった電源異常（欠相）は、ピッチ制御装置への電源供給ラインの途中（ナセル・ハブ間のスリッピング端子台）における接触不良により発生した。接触不良が発生した端子台は、スリッピングメーカー（海外製）の施工箇所である。端子台は振動による緩みが発生しにくいタイプのものが用いられていた。今回の状況について、端子台メーカーとスリッピングメーカーに確認したところ、当該風車では端子台にケーブルを挿入する際、素線のほつれを防ぐためにハンダ上げしてあるが、この部分で接触不良が発生した可能性が

ブレード基部に加わるモーメントの時間変化解析例
（第2軸のピッチが増大し、フラップPS方向の荷重が極値荷重を超過している）

長手方向の損傷位置解析例
（第2軸のみ、4.2m位置で、作用する力に対し、設計強度の比が1を割り込んでおり、損傷の可能性あり）

指摘されている。（本風車の設計では、交流電源の供給が失われても、バックアップ用蓄電池から電源供給が継続することで正常なピッチ動作が確保されている。端子台の接触不良等により交流側からの電源供給が異常となることは、システム設計上想定されており、重大な問題とはならない。）

スリッピング端子台における接触不良については、過去当該機で2015年3月12日に同様の接触不良が発生していたことが確認されている。この際には、風車メーカーにて、端子台の固定ネジの増し締めを行い、接触不良が解消したことを確認して復旧している。

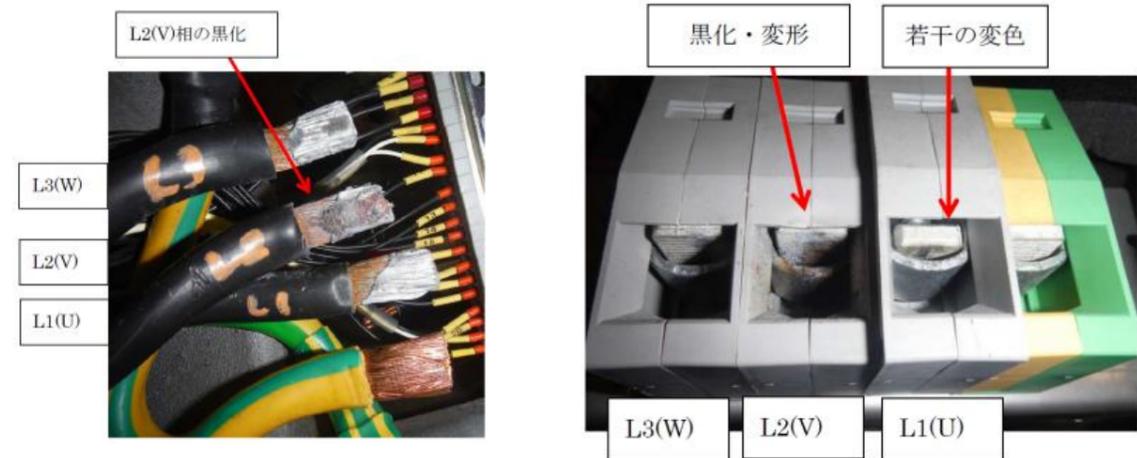


図5 端子台調査結果（左：ケーブル、右：端子台）

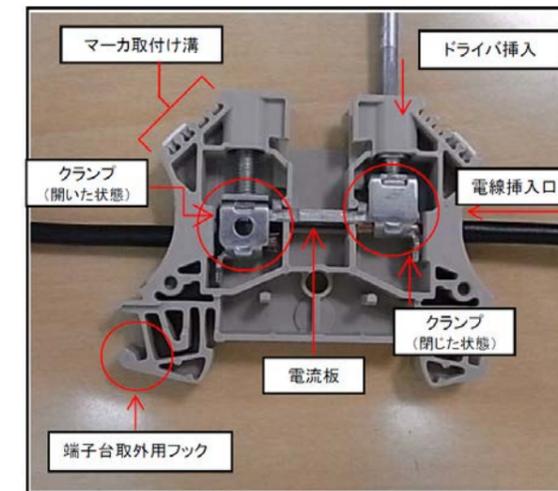


図6 同一メーカー製端子台の電線挿入と締め付け方法

端子台クランプの構造から、挿入するケーブルの先端はハンダ上げせず、柔軟性があった方が良かったと思われる。

2.2 ピッチ制御異常の発生（ピッチシステムの詳細）

今回の事故は制御装置の異常により発生しており、その概要は以下の通りである。

- (1) ピッチ制御方式の風車は、ピッチ角を制御することでローターの回転を管理している。ピッチ制御システムに異常が発生したり、風車の安全装置が動作すると、ピッチ角を90°方向に制御することで、ローターを停止する（緊急時フェザー制御）。
- (2) ピッチ制御装置メーカー（Mita社）が設計したピッチ制御プログラムは、緊急時フェザー制御中に、ピッチ制御装置内部で故障が発生した際、一旦緊急時フェザー制御を中断し、ピッチモーターにブレーキを掛けてその状態に固定し、内部故障の復帰を図った後に、フェザー制御を再開する構成となっていた。

- (3) また同プログラム (Ver3. 5. 8) には、ピッチ制御装置の外部故障である供給電源の「欠相 (交流 3 相のうち 1 ~ 2 相の喪失)」を「内部故障」と誤判断するため、欠相検出時にフェザー制御を中断する問題があった。
- (4) 事故時、スリップリングの端子台部分で、接触不良が発生し、3 軸のピッチ制御装置が欠相を検出した。
- (5) (2) の緊急時フェザー制御を中断する制御回路と、(3) の欠相を内部故障と誤判定する不具合があったため、(4) の接触不良発生時に、3 軸ともにフェザー制御が中断し、そのまま復帰できなくなった。これにより 3 軸のピッチが風を受ける状態で固定したため、過回転が発生した。
- (6) 過回転が発生した後に接触不良に起因する欠相が故障復帰してピッチが動き始めたため、ブレードの根元に大きな力が掛かり、ブレード折損に至った。

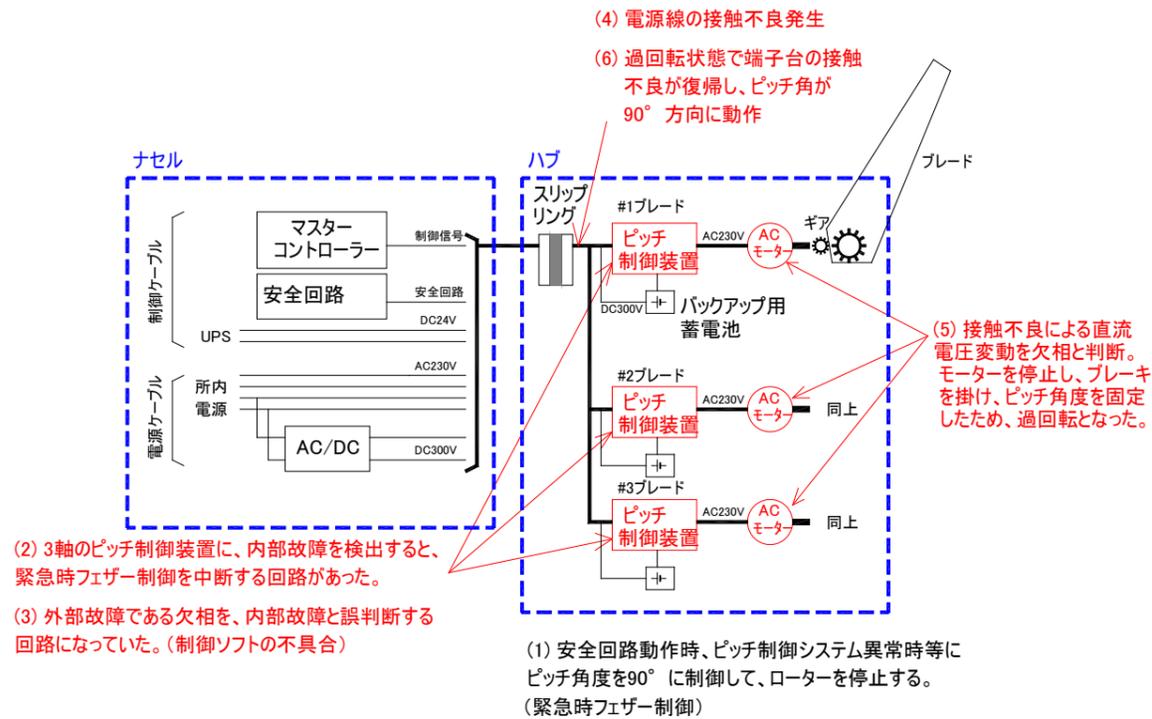


図7 Mita製ピッチ制御システムと今回発生した不具合

今回事故を起こした Mita 製ピッチシステムの制御ロジックの概要を図8に示す。

重故障などで緊急時フェザー制御 (ピッチ角を 90° に制御し、ローターの回転を停止する制御) を実施する際、ピッチ内部の健全性を確認し、ピッチ内部に異常がある場合に、「内部故障モード」に移行し、ピッチシステムの内部故障のリセットを試みる内容になっていた。「内部故障モード」は、緊急時フェザー制御を一旦中断、ピッチモーターを停止しピッチにブレーキを掛けて固定して、ピッチシステムの内部故障の復帰を図るものである。故障復帰できない場合には、緊急時フェザー制御が中断したまま未了となる。

※「内部故障モード」に移行し、ある軸のピッチが固定されたとしても、他の2軸あるいは1軸のピッチが動作することで風車を減速・ほぼ停止することができる設計となっている。

一方内部故障を判定する回路に、3軸同時に発生する可能性が高い「入力側欠相」(外部故障)が入っていた (Ver3. 5. 8)。このためスリップリングの端子台で発生した接触不良で、3軸同時に欠相を検出し、3軸ともに「内部故障モード」に移行し、3軸のピッチが固定したと考えられる。

なお入力側欠相は Mita 社が不具合を認識し、Ver3. 7. 2以降、内部故障モードの対象から削除されている。

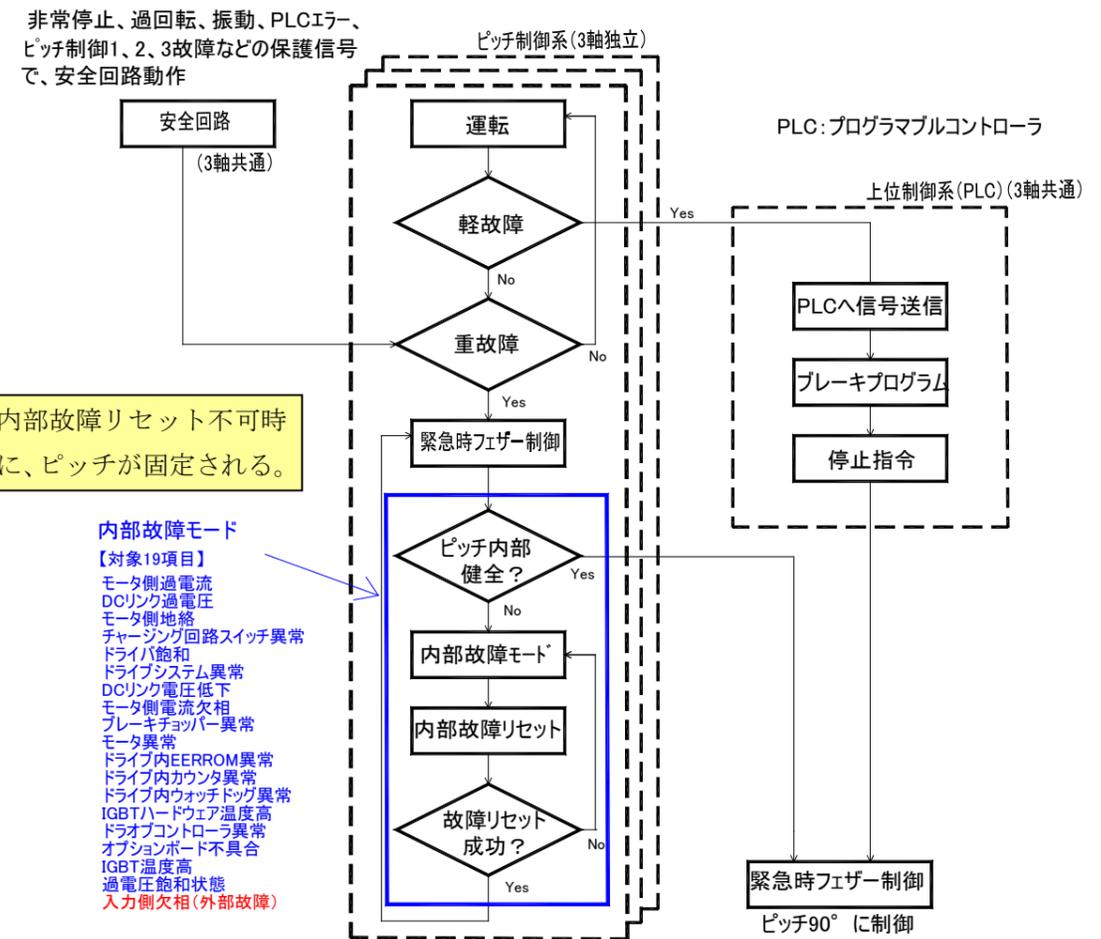


図8 Mita製ピッチシステムの制御ロジックの概要

2.3 管理上の問題

(1) ベンダー管理の問題

2.2で確認されたピッチシステムの不具合については、以下に示すベンダー管理上の問題があったことが確認された。

- Mita 社から風車メーカーやユーザーに対して、不具合情報ならびにその改修に関する報告が行われる体制になっていない。
- Mita 社は、欠相時にピッチが固定する不具合に気づき、ソフトを改良 (Ver. 3. 7. 2) していたが、その情報が風車メーカーおよびユーザーに伝達されていなかった。
- ピッチ制御システムの詳細がブラックボックス化され、風車メーカーが十分把握していない。

(2) 不具合事象発生時の管理体制の問題

2015年3月12日に当該風車でスリップリング端子台における接触不良による欠相が発生した際にも、今回事故同様、3軸ピッチ固定の不具合が発生し、過回転に至っている。その際は今回と異なり、欠相検出時の各軸のピッチ角が7°程度 (今回は0°) だったこと、負荷遮断時に第1軸、第2軸のピッチ角が20°程度動いた後に固定したことなどから、今回のような重大な過回転状態に至らず、最大回転数は28rpm程度に留まっている。3月12日

の事象においては、固定ネジの増し締めにより接触不良が解消したことを確認して復旧しており、過回転発生
の要因については分析が行われなかった。

(3) 風車メーカーの品質管理の問題

- 風車メーカーによるピッチシステムの確認が不十分であり、受入試験時に欠相に関する不具合を発見できなかった。
- ピッチ制御システムのソフトは度々バージョンアップされているが、風車メーカーはバージョンアップの履歴を管理していなかった。

2.4 まとめ

今回の事故要因をまとめると、図9の通りとなる。

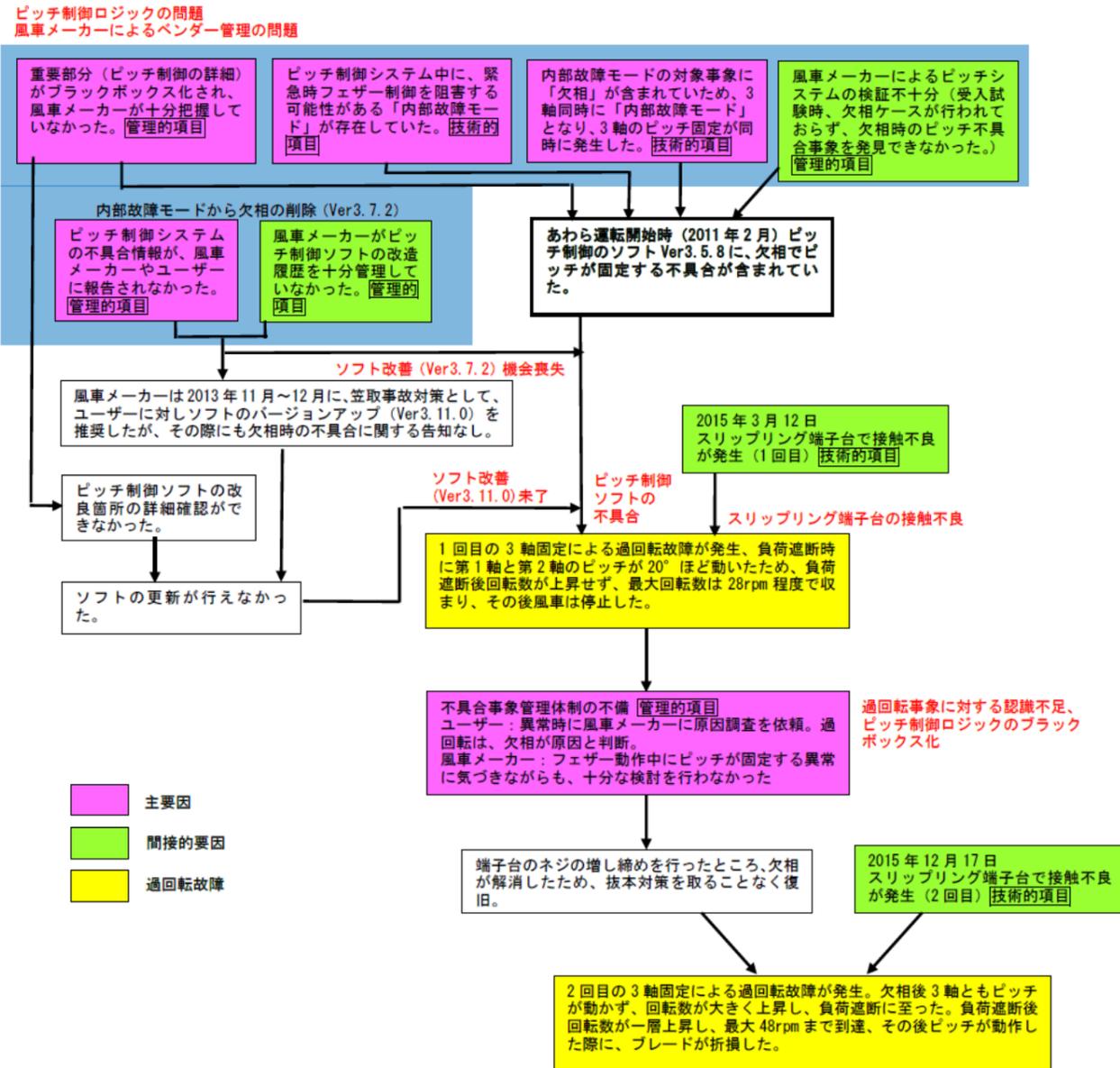


図9 今回事故の要因について

3. 再発防止策

3.1 概要

今回の要因	対策	備考
主要因		
(技術的項目)		
① ピッチ制御異常の発生 ② 緊急時フェザー制御を阻害する可能性がある「内部故障モード」が存在していた。 ③ 内部故障モードの対象事象に「欠相」が含まれていたため、3軸同時に「内部故障モード」となり、3軸のピッチ固定が同時発生した。	緊急フェザー制御を阻害するような制御を、排除する。 FTAを実施し、3軸同時故障に発展するような故障モードを確認する。3軸同時故障の発生が懸念されるものについては、十分な発生防止策を講じる	詳細は3.2参照
(管理的項目)		
① 風車メーカーのベンダー管理の不備 ② ピッチ制御システムの不具合情報が、風車メーカーやユーザーに報告されなかった。	①ピッチシステムメーカーと風車メーカー間で、不具合情報の共有に関する覚書を取り交わす。ピッチシステムメーカーからの情報は必要に応じ、ユーザーに伝達する。 ②ピッチシステムメーカーから風車メーカーに対して、ピッチ制御情報を開示する。	① 詳細は今後検討 ② 既に実施済み
③ 重要部分（ピッチ制御の詳細）がブラックボックス化され、風車メーカーが十分把握していなかった。	安全動作回路が動作した故障については、風力発電事業者と風車メーカーの本社間で原因調査を行い、再発防止策を検討することを、現地の運転保守心得に定める。	既に実施済み
間接的要因		
(技術的項目)		
① 電源異常(欠相)の発生 ② スリップリング端子台で接触不良が発生し、ピッチ制御装置が欠相を検出した。	当該部分の検査を全数実施する。今後定期的な導通状況を確認し、接触不良が発生した場合でも、バックアップ用蓄電池でピッチ制御が正常に行えることを、改良ソフトの工場試験にて確認する。	スリップリングの端子台部の検査は全台実施済み。全ての風車で良好な接触状況であった。 なお、ピッチ制御ソフトの不具合がなければ、電源異常が発生しても、過回転には至らなかった。
(管理的項目)		
① 品質管理の不備 ② 風車メーカーによるピッチシステムの検証不十分 ③ 風車メーカーがピッチ制御ソフトの改造履歴を管理しておらず、問題があった場合には、ユーザーに伝達し、必要な対策を実施する。	① 今回の再発防止対策検討のなかで、工場試験を実施し、十分に確認する。 ② ピッチ制御ソフトの改造については、風車メーカーにて十分把握し、問題があった場合には、ユーザーに伝達し、必要な対策を実施する。	欠相以外の不具合発生時にも、システムが正常に動作することを確認する。 ピッチ制御ソフト以外の部分についても、同様の対応をすることも検討する。

上記のうち、今回事故に直接的な影響を与えたものは、

- ① ピッチ制御ソフトに、緊急時フェザー制御を阻害する可能性がある「内部故障モード」含まれていたこと。
 - ② 「内部故障モード」の対象事象に「欠相」が含まれていたこと。
 - ③ ②の不具合について、ピッチ制御システムメーカーから風車メーカー、ユーザーに報告がなかったこと。
- の3点である。

3.2. ピッチ制御システムの見直し

今回事故（電源異常（欠相））の発生に伴うピッチ制御異常）自体は、内部故障モードの対象事象から「入力側欠相」を外すことでも再発を防止することができると考えられるが、類似の事象（緊急時フェザー制御の不動作）を確実に排除するため、ピッチ制御システムの再検討、見直しを実施した。

（基本的な考え方）

- 緊急時フェザー制御は、何よりも優先して機能すべきもの
- 一方、本ピッチ制御システムには、緊急時フェザー制御を阻害する可能性もある「内部故障モード」が存在（緊急時フェザー制御中に、ピッチを停止する動作をする）
- 内部故障モードの必要性を再検討（3軸ピッチ不具合発生時のFault Tree Analysis：FTAを実施）
- 内部故障モードが対象とする事象のうち「DCリンク過電圧」は、単一の不具合事象で3軸同時不具合に至る可能性があるが、それ以外は多重の不具合事象でしか3軸同時の不具合に至らず、3軸同時不具合発生時のリスクは極めて小さい。（設計において、想定する必要なし）
→内部故障モードを撤廃（別途、「DCリンク過電圧」時の対応を実施）

（具体的な対応）

- ピッチシステムの不具合（19事象）が発生すると、「内部故障モード」に移行していた点については、内部故障モード自体を撤廃する。（「DCリンク過電圧」以外の事象は、多重事象でのみ3軸同時不具合に至り、3軸同時発生時の可能性は小さいため故障発生時にも放置し、他の健全な翼のピッチ動作により、風車を停止する。）
- 「DCリンク過電圧」が発生して、ピッチシステムがその場停止した場合は、交流電源をピッチ制御システムから切り離し、ピッチシステムを1回リセットし、緊急時フェザーの完了を図る。

※「DCリンク過電圧」については、過電圧入力箇所にアレスタを設置する等の対策を実施しており、機器が損傷するような過電圧がピッチシステムに侵入する可能性は低い。しかしながらアレスタの制限電圧以下の過電圧が侵入し、3軸のインバータを同時に停止させる可能性が完全には排除できない。そのため、「DCリンク過電圧」が発生した場合は、交流電源をピッチ制御システムから切り離し、バックアップ用蓄電池とピッチモーターでピッチ角を制御する。ただし、交流電源を切り離した後もインバータが停止しているため、そのままではバックアップ用蓄電池でモーターを駆動することができない。そのためピッチシステムの故障のリセットを1回試みることにする。アレスタとピッチ制御機器は、過電圧に対する絶縁協調が図られていることから、「DCリンク過電圧」が発生しても、機器は損傷しておらず、1回リセット操作をすれば、ピッチシステムは動作可能になる可能性が高い。

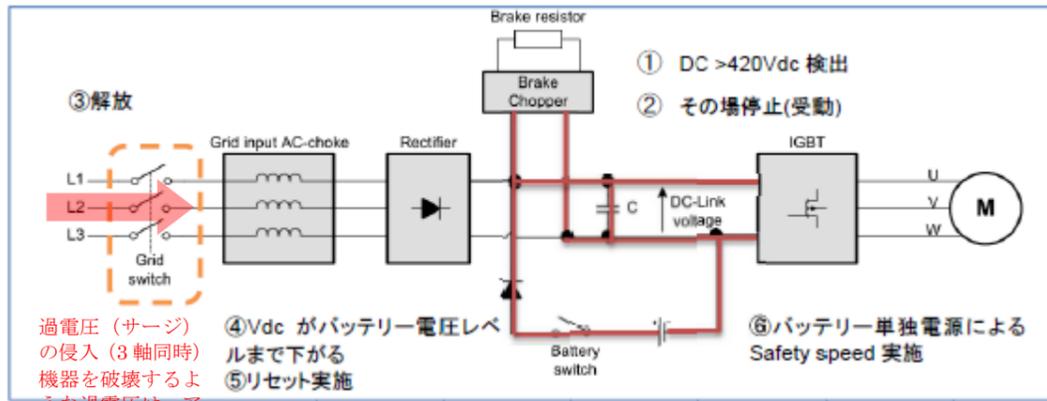


図10 DCリンク過電圧時の制御

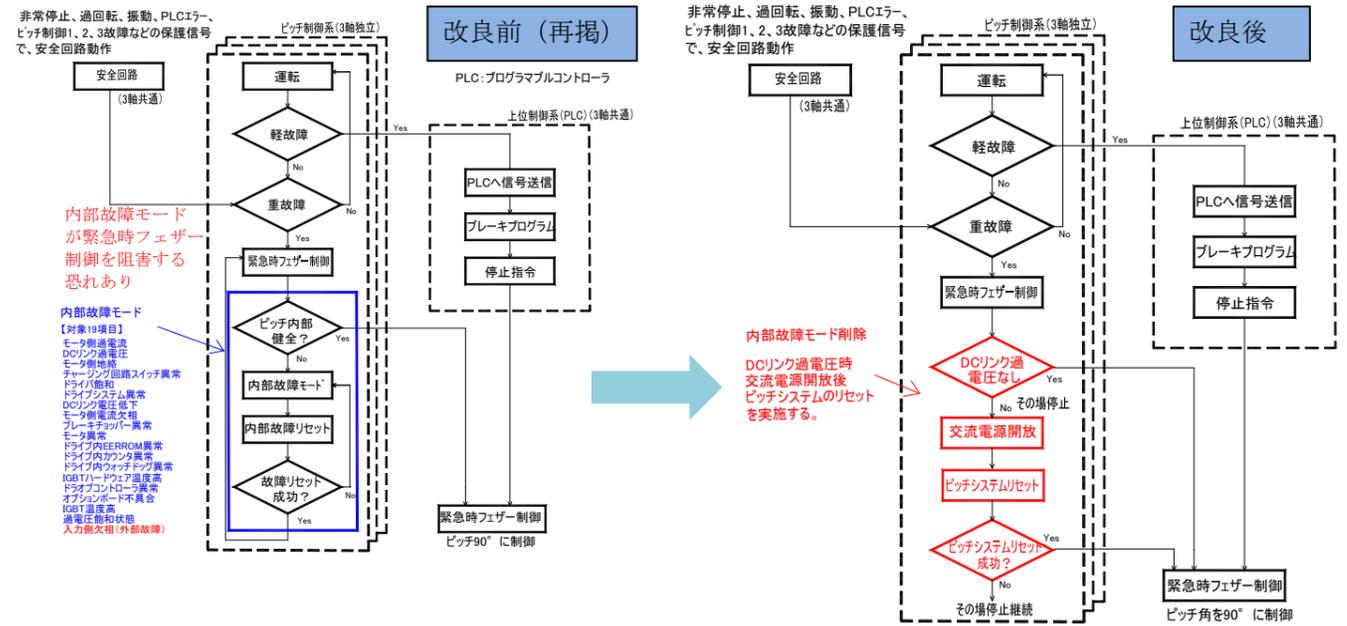


図11 Mita製ピッチシステムの制御ロジックの改良案（概要）

4. スケジュール（案）

以下のスケジュールは、本WGの結果を地元説明した上で、地元の了解を得られた場合の想定である。

項目	6月	7月	8月	9月
事故調☆ MetiWG ★ ※1	☆	★		☆
再発防止対策の実施				
ソフト改造（設計・製作）				
ピッチメーカー試験				
風車メーカー試験立会※2				
試験報告書提出				
プログラム更新				
運転再開準備				
地元説明				
安全確認のための試運転※3				
運転再開				
4号機復旧準備				
支持物基礎健全性確認				

- ※1 社内事故調査委員会、および新エネルギー発電設備事故対応・構造強度ワーキンググループ
- ※2 欠相の他、システム異常時や、DC過電圧をリセットした後もピッチが正常に動作することを、試験立会いにて確認する。
- ※3 地元の了解が得られた場合には、風車の回転数が大幅に上昇しない安全対策を講じた上で、4号機以外の風車を低出力にて運転し、風車の電気/機械部分の健全性と改良ソフトの確認を図り、風車の運転再開に備える。

以上