

**IEA 水力実施協定 ANNEX 11 水力発電設備の更新と増強
第二次事例収集（詳細情報）**

事例のカテゴリーとキーポイント

- Main : 1-d) アセットマネジメント、戦略的アセットマネジメント、ライフサイクルコスト分析
- Sub : 2-a) 電気機械 (E/M) 機器の技術革新、適用拡大
1-e) 低炭素社会における電力系統安定化のためのプロジェクト

プロジェクト名	: Estreito 発電所の改修—同期調相機のプロジェクト
国、地域	: ブラジル、サンパウロ州ペドレグーリョ
プロジェクトの実施機関	: ELETROBRAS FURNAS
プロジェクトの実施期間	: 2007年1月～2012年8月
更新と増強の誘因	: (A) 老朽化／故障頻発
キーワード	: 同期調相機、発電機、水力フランシスタービン、無効電力

要旨

次項以降を参照

1. プロジェクト地点の概要（改修前）

この事例は、出力が 1,000 MW を超える 5 つの FURNAS 発電所の 1 つである Estreito 発電所のものである。1962 年、FURNAS は、Estreito 発電所（旧称）の実現可能性調査を実施する作業にかかっていた。上流に位置する FURNAS の発電所での商業運転開始に合わせて、1963 年に建設が開始された。1969 年 3 月に初号機が稼働した。これは、多くのブラジルの製造業者と建設会社が参加したことから重要な出来事であり、当初の工程が守られたことを意味していた。

上流の FURNAS 発電所によって水流制御が実施され、Luiz Carlos Barreto de Carvalho ダムはほぼ均一レベルで正常運転している。流込み式貯水池により収用費用が抑えられ、Estreito 発電所は完成時点で、世界で最も kW 当たりのコストが低い発電所の 1 つとなった。

1969 年に設置された発電所は、サンパウロ州フランカ市に近いペドレグーリョに立地し、合計総出力 1,050 MW の 6 基のタービンを備え、20 の中都市のエネルギー需要に応える。

技術データ

項目		説明	
ダムおよび貯水池	ダム	タイプ	粘土コアのロックフィルダム
		最大高さ	92 m
		堤長	535 m
		堤頂幅	15.8 m
		天端標高	629 m
		総容量	429 万 m ³
	貯水池	最高貯水位	622.50 m
		最高洪水位	626.64 m
		最低水位	618.50 m
		浸水面積	46.7 km ²
		総容量	14 億 1,800 万 m ³
運転容量		1 億 7,800 万 m ³	
発電所	タイプ		カバー
	サイズ		177 m x 24.2 m
	発電 ユニット	基数	6
		回転数	112.5 rpm
		定格出力	175 MW
	タービン	タイプ	フランス垂直軸
		ロータ直径	5.8 m
		製造者	Voith コンソーシアム (ブラジルおよびドイツ)
		最大使用水量	306.6 m ³ /秒
		定格水頭	65 m
	発電機	周波数	60 Hz
		端子電圧	13.8 kV
		製造者	ASEA (ブラジルおよびスウェーデン)
	変圧器	基数	20 (稼動および予備)
		タイプ	単相
		総運転容量	1199.88 MVA
		変電比	13.8/345 kV
製造者		Jeumont Schneider (フランス)、 ACEC (ベルギー)、COEMSA (ブラジル)	

2. プロジェクト（更新/増強）の内容

2.1 誘因及び具体的なドライバー

- ① 状態、性能、リスクの影響度等
(A)-(b) 老朽化/故障頻発—耐久性、安全性、信頼性向上

- ② 価値（機能）の向上
(該当なし)

- ③ 市場における必要性
(該当なし)

2.2 経緯

1962年	FS調査を完了
1963年	着工
1969年3月	初号機の試運転
2007年1月	改修を開始
2008年2月	1号機を完了
2008年11月	2号機を完了
2009年9月	3号機を完了
2010年8月	5号機を完了
2011年6月	4号機を完了
2012年5月	6号機を完了
2012年8月	改修を完了

2.3 内容（詳細）

FURNAS は、Estreito 発電所の改修を 2007 年に開始し、2012 年に完了した。Estreito 発電所の改修に関する FURNAS の決定は、劣化と経年化によりユニットと補助系に不具合が再発したためであった。

FURNAS は、フランシスタービン羽根のキャビテーションを修理するために新素材とプロセスを研究し、「Cavitalloy」材料による修理を実施した。FURNAS は、ユニットが同期調相機として動作するよう加圧空気系を実装するプロジェクトも策定した。

1号機は2008年2月、2号機は2008年11月、3号機は2009年9月、4号機は2011年6月、5号機は2010年8月、6号機は2012年5月に運転復旧した。

1-d) アセットマネジメント、戦略的アセットマネジメント、ライフサイクル・コスト分析

「Cavitalloy」材料を適用するコストは、従来使用されていたステンレス鋼の羽根を復旧するコストより 30%高かった。しかし、修理の間隔は 50%長くなる傾向がある。このことから、FURNAS はキャビテーション耐性が向上し、保守費用が低減することにより、ユニットの性能が向上すると予想している。

ランナブレードがキャビテーションによって損傷しやすい理由は、タービンが常に無負荷または上限負荷モードの速度で、ヒルチャートキャビテーション限度を上下に外れる状態で動作していたためであった。この状況は制御系電気設備が Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) によって管理されていたために生じた。

FURNAS は、新しい方法を採用するまで 34,000 時間の運転でタービンを修理していた。新しい方法では 50,000 運転時間での保守点検に変更する予定である。

① 充填（キャビテーション浸食の修理）および被覆に使用される合金

世界での実際の技術開発から、コバルト（Co）と結合したオーステナイト合金では、キャビテーションが激しくなるが、耐性は向上することが分かった。

この耐性の向上を説明するためにいくつかの仮説が提案され、そのうち1つは表面に対する気泡崩壊変形によって発生する相転移（オーステナイトからマルテンサイト $\gamma \rightarrow \alpha$ ）または（オーステナイトからフェライト $\gamma \rightarrow \epsilon$ ）に関連した硬化のメカニズムに基づいている。

ステンレス鋼 308 および 309 では物質損失率が数 10 分の 1 低下し、装置の運転時間が増加する。当初、コバルト合金は被覆アーク溶接棒専用提供されたが、生産性が低かった。MIG / MAG ワイヤの新合金は、材料の硬度が高いため、小型の形状で製造することしかできなかった。

MIG / MAG 規格の溶接プロセスは、実用上の観点から、表面が粗い、融解しない、気孔が多い等の問題があることが分かった。そのため、キャビテーション部位に障害が発生し、キャビテーション耐性に優れる材料品質が大きく損なわれた。

主に溶接位置が悪いことによって MIG/MAG コバルトワイヤーに問題が生じることから、UFSC の溶接研究所は、復旧タービンへのコバルトワイヤーと MIG / MAG プロセスの適用を根底から変える装置を含む完全な技術（特許：特権およびイノベーション番号 PI0004698-1 「MIG/MAG 熱脈動」、2000 年 9 月 15 日）を開発した。

この技術の基盤は、MIG/MAG と TIG の利点を組み合わせ、熱パルスまたは二重パルス MIG/MAG プロセスと呼ばれた。高エネルギーのサイクルによって溶解不足を解消する一方で、低エネルギーのサイクルは架空位置の溶接に使われる。推奨溶接手順でタービンのキャビテーション浸食を修理する。

羽根を修理する第一段階は、損傷部位を特定し、プロフィールを判定して登録することである。表面と内部の不連続部分が除去され、非破壊試験法で確認された。

通常手順として、適合する被覆を施す前に、溶接構造を再構築する（たとえば、炭素鋼構造には AWS E71T1 を使用し、マルテンサイト系ステンレス鋼構造 E410・NiMo には AWS を使用する）。構造を再構築した後、2 層の AWS 309L ステンレス鋼を施す。その後、コバルト合金の被覆を MIG / MAG パルス溶接で 2 層に施す。

清潔にして非破壊検査「インターパス」を実施することが重要である。コバルト合金を溶接するための予加熱は不要だが、構成部品の表面から湿気と水素を除去する必要がある。溶接は通常、入熱を減らすため、多層で施される。

溶接のガス保護は、98% Ar（アルゴン）+ 2%（酸素）から構成される。架空位置の溶接に推奨されるパラメータは、コンタクトチップと部品の「突出部」との距離が 10 mm を超えない（コンタクトチップの端にノズルが 5 mm 突き出る）こと、150A および 22V である。ワイヤーの極性は必ずプラスとする。

② ソース溶接合金

試験は、電力研究所 CEPTEL (RE No.693/94-R) で実施され、コバルト合金に関して 309 の強度を比較した。従来の 309AWS-Mo 合金の試料は、コバルト合金の抵抗の 11 分の 1 未満の 5.5 mg/時となった。ただし、キャビテーション実験室試験とは条件が異なる水力タービンでは、この関係は 2.5~5 倍の範囲で観察された。

③ コバルト合金をベースとする被覆

- 上記の手順に従い、深さ 10 mm になるまで炭素鋼を充填する。
- 少なくとも 2 回の溶接を行い、ステンレス鋼の沈着を続ける。
- 少なくとも深さ 6 mm になるまで、ステンレス鋼の表面調整を行う。
- 液体浸透探傷試験を実施し、溶接結果について細孔や亀裂などの存在を評価する。
- 仕上げ層が 3 mm になるまで、コバルト合金芯線を充填する。
- コバルト合金を炭素鋼に溶接することはできない。

1-e) 低炭素社会にける電力系統安定化のためのプロジェクト

送電網の無効電力を制御し、発電から負荷装置までの電力流を保証する電力用コンデンサや分流利アクトルなどの送電網系統の他の調相機と連携して、同期調相機の水力運転が実施される。長期にわたって同期調相機として動作すると発電機及びタービンにマイナス影響を与えるが、電力系統事業者からの要請によりエストレイト発電所は長期にわたって同期調相機としての非常に重要な役割で連続動作している。

2-a) 電気機械 (E/M) 機器の技術革新および適用拡大

もう 1 つのプロジェクト変更は、ユニットが同期調相機として動作するように、ドラフトチューブの水位を低くする「加圧空気系」の実装であった。この環境では、ユニットが同期調相機として動作し、「無負荷速度」モードで動作することがなくなるため、タービンのキャビテーションが軽減される。

サプライヤーは、ドラフトチューブの水位低下システムを設計し、以下の装置を供給した。

- 制御装置付きの空気圧縮機プラント
- 油圧调速機の再利用となる圧力容器
- 空気噴射弁
- ランナーカバーライナー用の冷却水弁
- 水位、流量、圧力、温度制御計装および回路
- 配管および接続部

システムは、ドラフトチューブの水位を低下させ、ランナーを空中で回転させて、全 6 号機を同期調相機として動作させるために圧縮空気を供給する。下流の最高水位は 564.60 m である。圧縮空気のシステムは、13.8 バールの 5 基の圧縮機から構成される。各圧縮機の定格出力は 200CV である。圧縮空気を格納する 6 つの圧力容器は、1 つの UG に供給できる十分な数量となっている。

ドラフトチューブの空気排出を制御するため、弁が调速機によって水圧で作動する。DN 10 "ACX-02 弁は急速空気排出用、DN 3" ACX-03 弁は排出用の交換部品であり、この状態はドラフトチューブの水位を低下させることを目的とする。

発電機に戻る DN 10 "ACX-04 排気弁が用意され、ドラフトチューブから下流に空気を抜く分岐管に設置される。

ユニットを転換して同期調相機として動作させる操作は、プラントの監督および制御のデジタルシステムで制御される。

同期調相機モードではタービンの上カバーライナーへの冷却水系、弁、AFX-01 が同時に作動し、開口部が完全に閉じられる。タービンの下カバーライナーの冷却水は、開口部によって渦巻ケーシングに接続されたすべてのホールパイプが解放されると自動的に作動する。

スイッチレベルは多くの問題があったため、弁と ACX-03 および ACX-04 を制御する監督及び制御のデジタルシステムに信号を送信する圧力スイッチに置き換えられた。

3. プロジェクトの特徴

3.1 好事例要素

(記載なし)

3.2 成功の理由

(記載なし)

4. 他地点への適用にあたっての留意点

(記載なし)

5. その他（モニタリング、事後評価等）

(記載なし)

6. 参考情報

6.1 参考文献

- 1) Project of pressurized air system and control system regarding the operation of the units as synchronous condensers—Andritz Brazil Company
- 2) Project of application of new materials and process to repair cavitation on Francis turbine blades—FURNAS Company

6.2 問合せ先

会社名: ELETROBRAS FURNAS

URL: <http://www.furnas.com.br/>