

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-e) 低炭素社会における不安定電力系統安定化のためのプロジェクト

プロジェクト名	: 奥多々良木(おくたたらぎ)発電所 1、2号発電電動機可変速化プロジェクト
国、地域	: 日本、兵庫県
プロジェクトの実施機関	: 関西電力株式会社
プロジェクトの実施期間	: 2008年～2019年（予定）
更新と増強の誘因	: (C)発電機能向上の必要性
キーワード	: ○可変速化 ○周波数調整 ○中間羽根付ランナ ○既設トンネル拡幅

要旨：

電力系統における深夜帯の周波数調整は、AFC（Automatic Frequency Control）機能を有する火力発電所と、揚水発電所のうち特に可変速機により行われている。しかし、可変速機を有する大河内発電所3・4号機では、高経年化に伴う長期間の大型改修工事が計画されており、深夜帯の周波数調整能力の低下が懸念される。そこで、定速機である奥多々良木発電所1・2号機の大型改修工事に協調し、可変速揚水発電システムを導入することで周波数調整能力を確保する。

1. プロジェクトの概要（改修前）

1.1 プロジェクト地点の概要

奥多々良木発電所は、1971年4月に本格着工し、最大出力1,212MW（303MW×4台）の日本最大級の揚水発電所として、1975年6月に1～4号機全ての運転を開始した。



図1 奥多々良木発電所位置図

その後、電力需要の増加ならびに供給信頼度の向上に対処するため、黒川ダム（上部調整池）および多々良木ダム（下部調整池）を現状のまま活用しつつ、新たな水路と 5・6 号機（360MW×2 台）を増設し、1998 年 6 月に運転を開始、現在は最大出力 1,932MW の揚水発電所として運用している。

発電所位置図を図 1 に、可変速化工事の対象となる奥多々良木発電所 1・2 号機の工事前と工事後の設備諸元を表 1 に示す。

表 1 奥多々良木発電所 1・2 号機 設備諸元

		工事前（定速機）	工事後（可変速機）
認可出力	発電時	303MW（力率 0.95）	システム 303MW（力率 0.95） 320MW（力率 1.0）
	揚水時	320MW（力率 1.0）	
ポンプ水車	型式	立軸フランシス型ポンプ水車	立軸フランシス型ポンプ水車
	出力	水車：310MW ポンプ：314MW	水車：311.7MW ポンプ：311.7MW
	使用水量	94m <sup>3</sup> /s	94m <sup>3</sup> /s
	有効落差（基準）	383.4m	383.4m
	定格回転数	300min <sup>-1</sup>	285～315min <sup>-1</sup>
発電電動機	種類	直流励磁 三相交流発電電動機	交流励磁 三相交流発電電動機
	型式	回転界磁全閉他力通風形	回転界磁全閉自力通風形
	容量	320MVA	350MVA
	定格回転数	300min <sup>-1</sup>	285～315min <sup>-1</sup>

## 2. プロジェクト（更新/増強）の内容

### 2.1 誘因と促進要因（具体的なドライバー）

①状態、性能、リスクの影響度等  
（なし）

②価値（機能）の向上

(C)－(b) 発電機能向上の必要性－発電用途の変更、機能追加

・深夜帯の周波数調整能力の低下

可変速機を有する大河内揚水発電所 3・4 号機は、発電電動機の高経年化に伴う大型改修工事が計画されており、電力系統における深夜帯の周波数調整能力の低下が懸念される。これに対処するために、AFC 機能を有する火力発電の比率を増加させると、燃料費の拡大など運用面における経済性が悪化する。

③市場における必要性

太陽光発電や風力発電など、天候によって出力変動を伴う再生可能エネルギー電源の増加に伴い、電源の周波数調整能力が相対的に不足することが予測される。

## 2.2 経緯

2006.9	『既設揚水の可変速化について提案』	検討開始
2008.2	『奥多々良木1・2号機の可変速化』	検討完了
2008.12	工事事務所発足	
2009.4	工事現地事務所開設	
2009.8	準備工事	着手
2010.3	建築工事	着手
2010.5	調査工事	着手
2010.7	調査工事	完了 および 土木工事 着手
2011.5	土木工事	完了
2011.11	建築工事	完了
2015.10	本格着工	予定
2017.12	2号機竣工	予定
2019.2	1号機竣工	予定

## 2.3 内容（詳細）

### 1-e) 低炭素社会における不安定電力系統安定化のためのプロジェクト

- ・可変速化による周波数調整能力の向上

電力系統における深夜帯の周波数調整は、主に AFC 機能を有する火力発電所と、揚水発電所のうち、特に可変速発電電動機を有する大河内発電所3・4号機にておこなわれている。しかし、深夜帯においては、需要の低下に伴い周波数調整能力を有する電源を減少させる必要があり、調整能力も相対的に低下することになる。このような中、大河内発電所3・4号機は、揚水時の AFC 運転が可能な可変速揚水発電システムとして高稼働の運用が続いているが、近い将来、長期間に亘る大型改修が予定され、その間はさらに周波数調整能力が低下することが懸念される。その代替として、新たな可変速揚水発電システムを導入することが求められていた。

この可変速化プロジェクトは、奥多々良木発電所1・2号機の大型改修（老朽改修）に併せて、1974年の運転開始から38年を経過した303MW発電電動機を、定速機（ $300\text{min}^{-1}$ ）から可変速機（ $285\sim 315\text{min}^{-1}$ ）へ改修する工事である。可変速化により、深夜の調整用火力電源の並列抑制による燃料費削減と、可変速機の部分負荷運転時における発電側効率向上が見込まれ、電力系統の安定化に大きく寄与することが期待される。

火力発電所の AFC 容量は、一般的に単機で1.5%～5%程度であるのに対し、奥多々良木発電所1・2号機の可変速機については、単機で30%程度の調整能力を有するものであり、電力系統の安定化への効果は大きい。また、将来、再生可能エネルギー等の出力変動の大きな電源比率が増大しても、それに耐えうる周波数調整能力を持つ必要があり、市場からの必要性も高まると考えられる。

可変速化に伴う、工事前と工事後の発電電動機と励磁装置の設備諸元の比較を、表2に示す。

表 2 奥多々良木発電所 1・2号発電電動機・励磁装置 設備諸元

項 目		改良工事前 (定速機)	改良工事後 (可変速機)	(参考) 大河内(可変速機)	
システム電力調整幅		—	90MW	160MW	
発電電動機	容 量	320MVA	350MVA	395MVA	
	回転速度	300min <sup>-1</sup>	285~315min <sup>-1</sup>	330~390min <sup>-1</sup>	
	固定子	寸 法	高さ : 3,230mm 径 : 8,300mm	高さ : 3,540mm 径 : 8,800mm	高さ : 4,300mm 径 : 8,700mm
		質 量	413t	374t	502t
	回転子	寸 法	高さ : 3,340mm 径 : 6,394mm	高さ : 4,900mm 径 : 6,480mm	高さ : 6,000mm 径 : 6,500mm
		質 量	590t	479t (起重機吊上げ荷重 490t)	750t
励磁装置	容 量	720kVA	35,800kVA	72,000kVA	
	出力電圧	375V	5,580V	5,200V	
	出力電流	1,920A	3,700A	8,000A	
サイリスタ素子	電 圧	—	5,200V	4,000V	
	電 流	—	5,400A	3,000A	
	素子構成	—	2S1P 72 アーム	3S3P 72 アーム	
	素子サイズ	—	110mm	90mm	

・既設設備を流用した可変速化

このプロジェクトは、既設設備の流用を考慮した改修であり、図 2 に示す発電電動機の主要部位となる固定子基礎、下部ブラケット、下部軸および基礎ベースなどを流用する。また、既設の天井クレーンの定格吊り荷重内に収まるよう、電磁気構造設計により固定子の軽量化を図り、既設の天井クレーンの流用を実現している。その他、既設の主要変圧器、相反転断路器、同期遮断器なども流用することとしており、工事前の主回路を図 3 に、工事後の主回路を図 4 に示す。

# 発電電動機の改良範囲

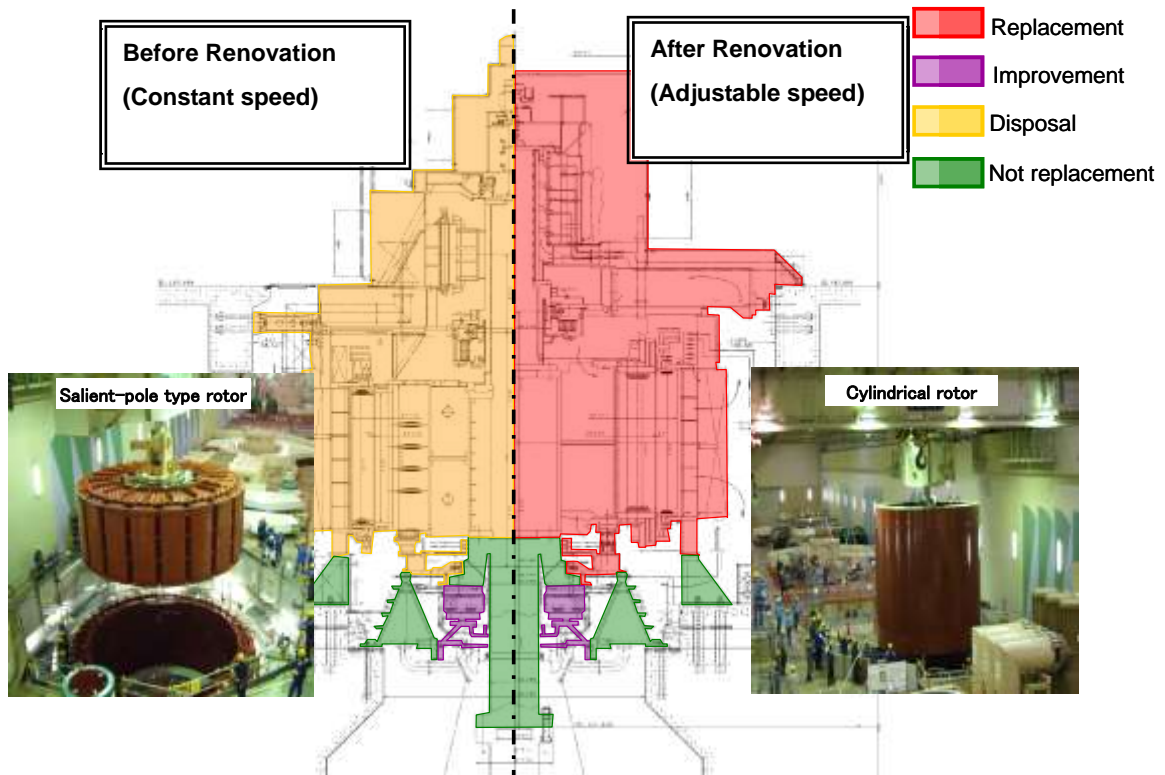


図2 奥多々良木発電所 1・2号発電電動機 工事範囲

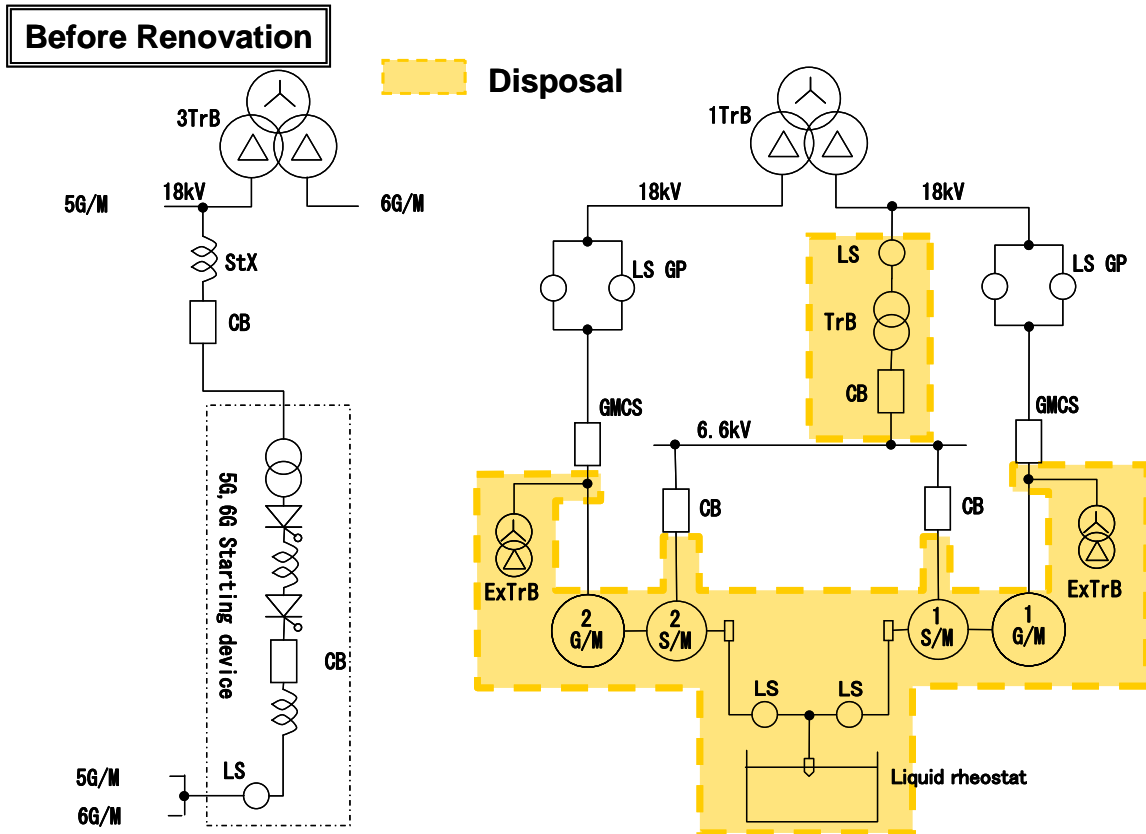


図3 奥多々良木発電所 1・2号発電電動機 主回路 (工事前)

After Renovation

Replacement

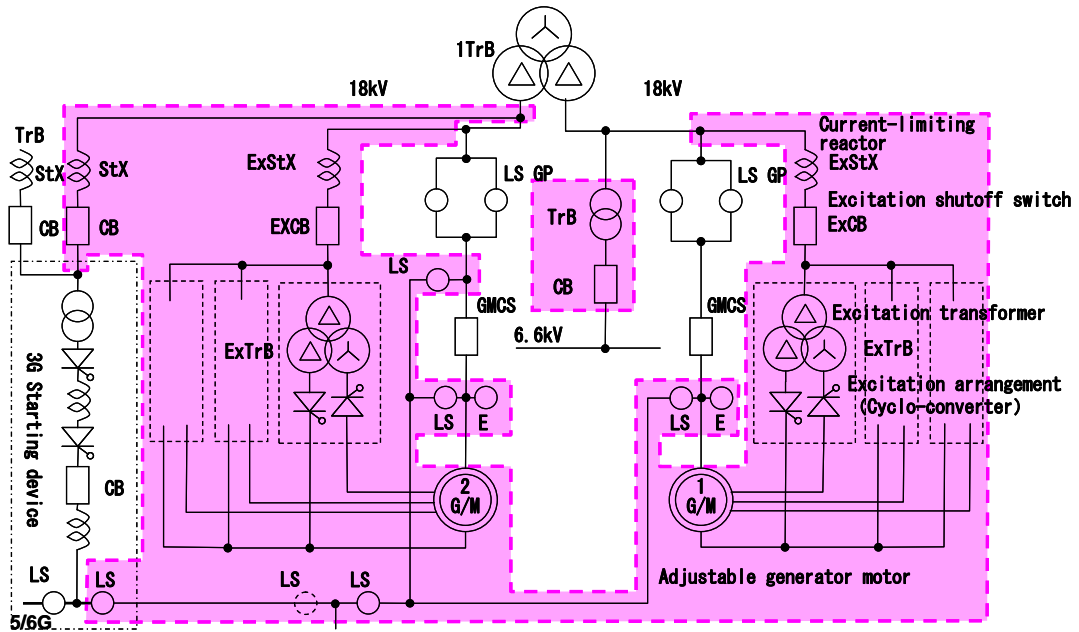


図4 奥多々良木発電所 1・2号発電電動機 主回路 (工事後)

・ 中間羽根付ランナ

ポンプ水車ランナを更新するにあたり、より広い運転領域における高効率化を目的とした「部分負荷効率特性」、流用する既設のガイドベーンとの干渉による異状振動を回避するための「既設ガイドベーンとランナの相性」、輸送制限による「ランナ二分割対応」を考慮して検討した。また、可変速の運転範囲の上限が既設の主要変圧器容量を超えない設計とし、ポンプ最大入力を320MWから280MWに下げ、その改造として上部吸出し管径の縮小を行なうことで、可変速の運転範囲  $\pm 45\text{MW}$  (90MW) を最大限活用することとした。

以上を踏まえ、CFDによる可変速特性、キャビテーション特性の解析や、模型試験による性能確認などを実施した結果、280MW 中間羽根付 (既設の6枚羽根から、4枚+中間羽根4枚の計8枚羽根) のポンプ水車ランナを選定している。ランナ更新により、効率の向上、特に部分負荷領域における効率向上を図り、発電電力量の増加が期待できる。

**Operating Range of Adjustable speed System  
(Pumping mode)**

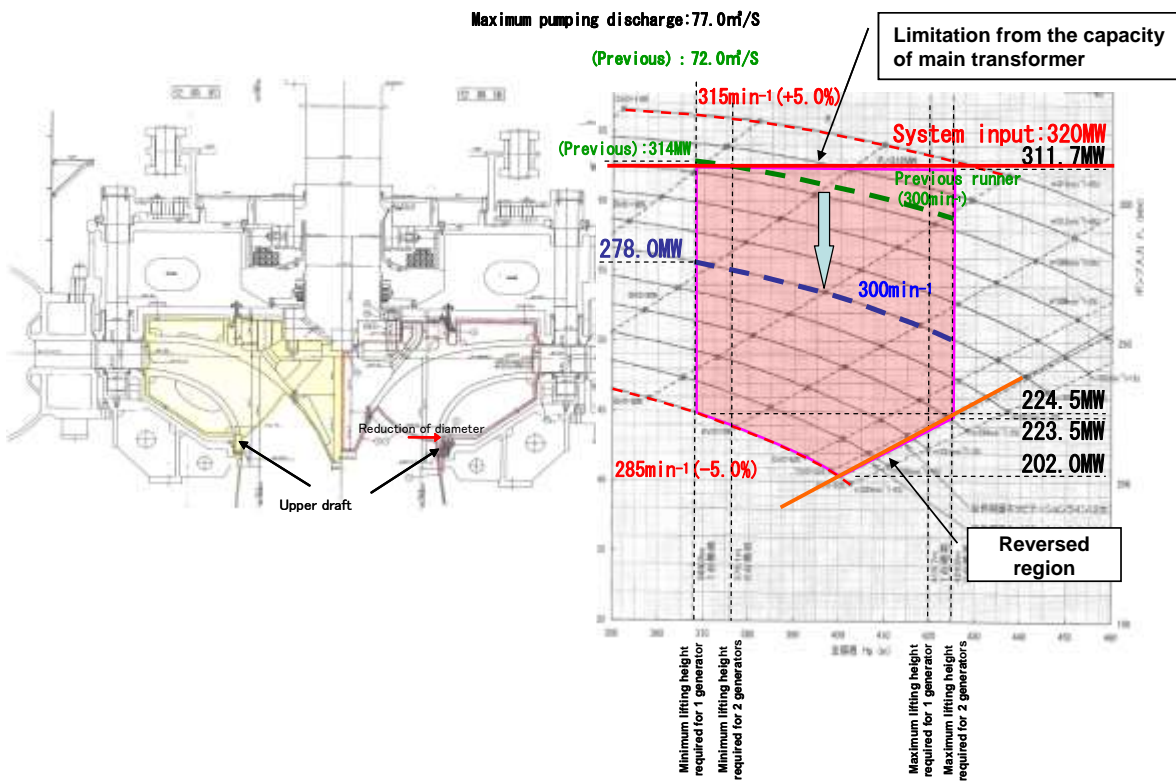


図5 奥多々良木発電所 1・2号発電電動機 可変速運転範囲

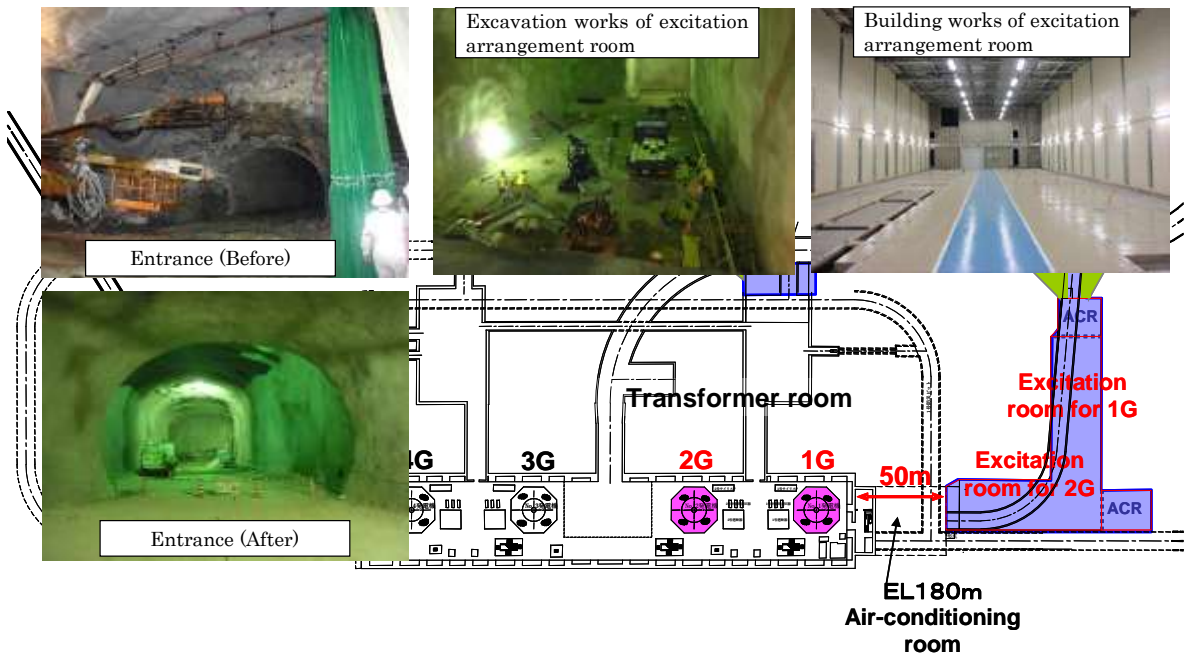


図6 奥多々良木発電所 1・2号機 可変速化工事状況

- ・既設トンネル拡幅によるスペース確保

可変速化のために機能増強する励磁装置の設置スペースとして、地下発電所内に大きなスペースを確保する必要がある。新たに発電所を建設する場合と異なり、運用中の地下発電所に大きなスペースを確保するのは、計画当初から課題となっていた。図 6 に示すように、励磁装置の設置スペースを確保するため、既設のトンネルを拡幅する方法を採用した。発電電動機から約 50m 離れた既設の横坑を発破により掘削拡幅し、新たに励磁装置室を設けている。

- ・高電圧高強度回転子コイル絶縁設計の合理化

可変速機の回転子コイルは、大電流での交流励磁であり、また、高電圧が印加されることから、その構造は通常の定速機と異なり、固定子コイルと同様の構造となる。しかし、回転子コイルは主機運転による大きな遠心力を受けるとともに、励磁電流の頻繁な増減に伴うヒートサイクルを受けることから、固定子コイルと同様の絶縁設計とすることができない。これら可変速機の回転子コイルの機械的劣化やヒートサイクル劣化に対し、優れた耐力を要する絶縁設計とする必要がある。

そこで、既に可変速機を運用している大河内発電所の運用実績を基に、回転子コイルの絶縁設計の見直しや試験検証をおこない、機械的劣化やヒートサイクル劣化に対し、より優れた絶縁設計を、奥多々良木発電所 1・2 号発電電動機の回転子コイルに採用する計画としている。

### 3. プロジェクトの特徴

#### 3.1 好事例としての要素（注目点）

- ・既設設備の固定子基礎や下部ブラケット、下部軸および基礎ベースなどを流用した、定速機の可変速化改修
- ・部分負荷効率向上や可変速運転範囲拡大を目的とした中間羽根ランナの採用
- ・運用中の発電電動機に配慮した地下発電所内における励磁装置設置スペースの確保
- ・可変速機の回転子のヒートサイクル劣化などに耐える高電圧高強度回転子コイル絶縁設計の合理化

#### 3.2 成功の理由

地下発電所に励磁装置の設置スペースを掘削する方法として、機械掘削を検討していたが、多大な工期と費用を要することから、発破による掘削を実施している。

発破箇所が発電機室に隣接しているため、既設の発電機器に影響を及ぼす恐れがあり、導火管付き非電気式雷管を使用し、多段発破により実施した。これは、電気式雷管に比べて微細な発破を可能とし、発破振動の低減に効果的となる。また、導火管による点火のため、発電所周辺の迷走電流による誤爆の防止にも有効である。

この導火管付き非電気式雷管による多段発破を採用し、発破手順を最適化することで、既設発電機器に振動の影響を与えず、さらに運用中の発電機器に対し無停電による掘削を可能とした。



#### 4. 他地点への適用にあたっての留意点

- ・水路時定数に起因する出力変化レートの制約

可変速システムの導入により入出力の応答性が向上し、電力系統の安定化に大きく寄与する。これは、可変速機の電力制御方式として、関西電力は有効電力優先制御を採用しており、入出力変更指令を受けた場合、励磁電流の位相を変化させて内部位相角を調整し、電氣的に瞬時に応答することができるためである。

電氣的に瞬時に応答した後に、発電機出力に追従して水車入力を補うべく、ガイドベーン開閉により素早く水車入力をバランスさせる必要があるが、奥多々良木発電所のように、水路長が長い場合（総長 3,972m）、水路時定数が大きくなるため、水車入力の応答に遅延が発生する。この応答の遅延が著しいと発電機出力である電氣的応答に追従できず、回転速度が過度に低下することから回転速度の運用範囲を逸脱する可能性がある。そのため、出力変化レートの設定は水車入力応答を考慮する必要がある。また、水路時定数が大きい場合、サージタンクの水位変動に影響し、ガイドベーンの開閉動作が増加して機器に与える負担が大きくなることも考慮しななければならない。急激な出力変更指令に対し、回転速度の運用範囲を逸脱せず、機器に対する負担の小さな最適な出力変化レートを検討する必要がある。

- ・既設設備の流用に対する検討

既設の定速機を可変速化する場合、ブラケットやガイドベーン、基礎などの流用する設備との適合について十分検討することが重要である。

このプロジェクトにおいて特に留意すべき事項となったのが、回転子の上部軸受の支持剛性である。可変速化に伴い回転子の形状が定速機の突極形から円筒形になり、軸方向の寸法が長くなる。そのため、下部の水車周りの設備を流用した場合、上部軸受の支持点が上側へシフトすることから、その位置に合わせた軸受支持の補強が必要となる。流用する設備に対する寸法や剛性を含めた全体の設備構成の設計においては、新たに発電所を建設する場合にはない検討を必要とする。

#### 5. その他（モニタリング、事後評価）

なし

#### 6. 参考情報

##### 6-1 参考文献

なし

##### 6-2 問合せ先

会社名：関西電力株式会社

URL：<http://www.kepco.co.jp>