

主被動風機調頻控制策略研究

學生：張涴渝、陳政安

指導教授：吳元康 教授

摘要

本專題研究比較多項風機暫態調頻策略，包括下垂控制、傳統慣量控制、扭矩功率控制，以及提出的 TFS 與 ATFS。此外，利用分段多項式、ANN 與 XGBoost 建立 AI 模型，依風速預測傳統慣量控制最佳增益參數 ($K_{inertial}$ 、 k_{droop})，以提升在跳機事故下的頻率支援效果。結果顯示，AI 最佳化增益能提升頻率最低點並維持風機轉速於安全範圍，優於固定參數的控制方式。

研究動機

隨著再生能源併網比例提高，電網慣量下降，使跳機時的頻率下跌更快。風機雖具動能，但因透過變流器並網，必須依靠控制策略才能參與調頻。既有方法如 TFS、ATFS 雖能主動提升功率，但參數設定複雜；傳統慣量與下垂控制則因風速不同使最佳增益差異大，易造成支援不足或風機失速。因此，本研究結合控制策略比較與 AI 建模，使風機能依風速自動找到最佳參數，在事故瞬間提供最有效且安全的頻率支援。

實作方法

本研究於 PSCAD 建立 6-bus 系統，模擬風機在跳機事故下的暫態調頻行為。風機調頻控制策略（圖一），主要分為主動與被動控制兩大類。

主動控制部分本研究實作 TFS 與 ATFS。TFS 在頻率下降時暫時提升功率以釋放動能（圖二）；ATFS 則依事故嚴重度與可用動能自動調整補償功率，採拋物線軌跡釋放（圖三），避免轉速過度下降。

被動控制部分，傳統慣量控制架構（圖四），其中 $-K$ 與 $-1/R$ 分別對應 $K_{inertial}$ 與 k_{droop} 增益參數。由於固定增益無法適應不同風速，本研究以批次模擬掃描風速 $7 \sim 10 \text{ m/s}$ （限制安全轉速 $\geq 0.7 \text{ p.u.}$ ），建立最佳增益資料庫（約 40 筆資料），並在 PYTHON 中以分段多項式、ANN 與 XGBoost 建立「風速 \rightarrow 最佳增益」預測模型，以 normalized RMSE 評估（表一），紅字為表現最佳之模型。結果顯示，無論風速高低，四次多項式在 $K_{inertial}$ 皆具有最低誤差；而 k_{droop} 在低風速區以四次多項式最佳，高風速區則由 ANN 具有較佳預測能力。本研究最終將 AI 預測的最佳增益套用於傳統慣量控制，作為 AI 最佳化慣量控制，並與其他調頻控制策略比較其效果。

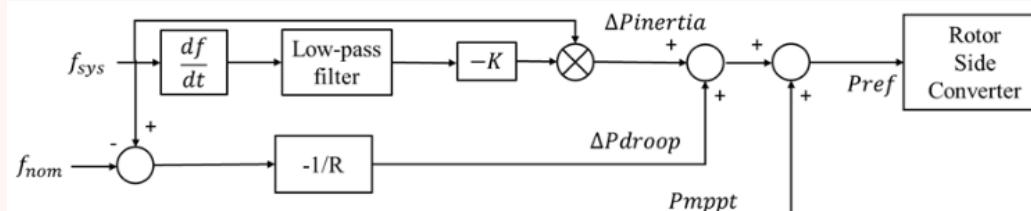
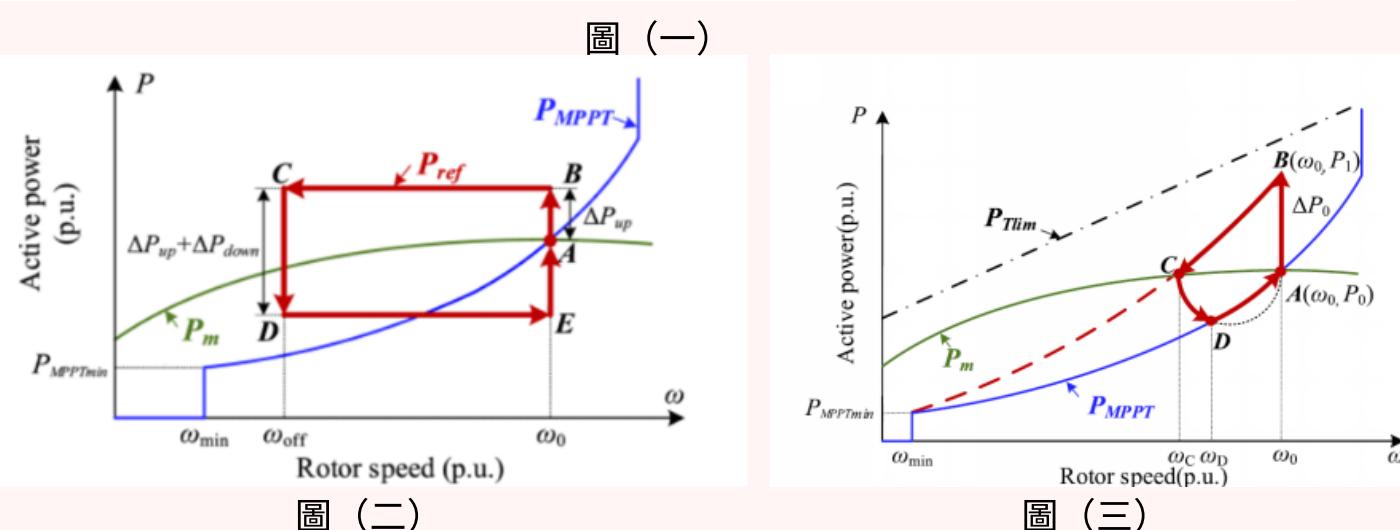
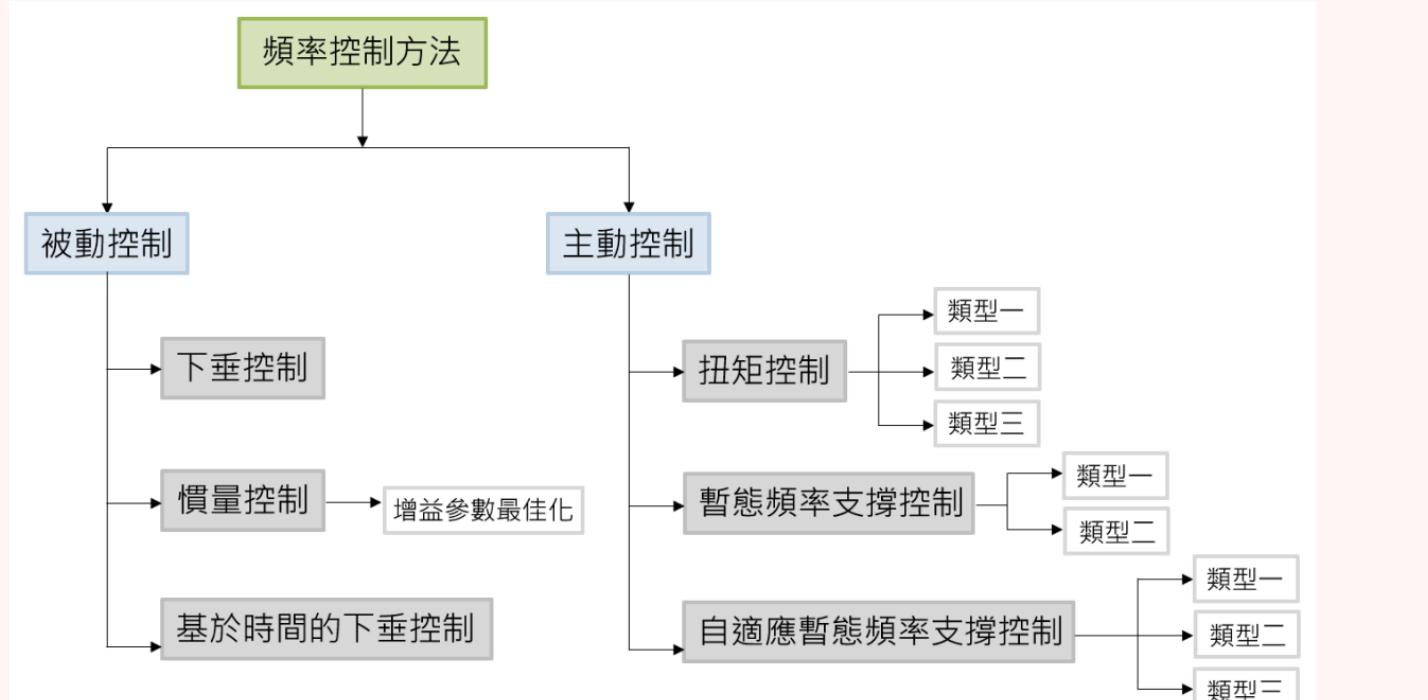


圖 (四)

Target	Model	$\leq 9 \text{ m/s}$ Train nRMSE	$\leq 9 \text{ m/s}$ Test nRMSE	$> 9 \text{ m/s}$ Train nRMSE	$> 9 \text{ m/s}$ Test nRMSE
$k_{inertial}$	Polynomial	4.31% (Quartic)	2.62% (Quartic)	2.65% (Quartic)	3.91% (Quartic)
	ANN	$4.20\% \pm 0.53\%$	$5.37\% \pm 2.17\%$	$2.91\% \pm 0.79\%$	$4.88\% \pm 1.59\%$
k_{droop}	Polynomial	1.10% (Quartic)	0.74% (Quartic)	3.45% (Quadratic)	9.44% (Quadratic)
	ANN	$1.94\% \pm 0.19\%$	$2.38\% \pm 1.28\%$	$4.02\% \pm 0.99\%$	4.90% \pm 3.25%
	XGBoost	$2.20\% \pm 2.49\%$	$5.15\% \pm 3.52\%$	$3.22\% \pm 1.55\%$	$6.11\% \pm 3.46\%$

表 (一)

模擬結果與結論

在風速 8 m/s 與 10 m/s 下，本研究比較十種頻率控制策略，表(二)、表(三)分別為低風速 8 m/s 與高風速 10 m/s 模擬結果。高風速時風機能動能充足，Torque 控制與 AI 最佳化慣量控制能最有效提升頻率最低點，Torque 改善幅度最大，但因功率推至扭矩極限，造成轉速快速下降，而 AI 最佳化慣量控制則同時提升頻率並維持安全轉速；低風速時，由於可用動能有限，Torque 控制釋放能量過多，轉速降至接近保護下限，TFS 與 Time-Droop 仍需依風速調整參數才能避免二次降頻，而 ATFS 能依擾動程度自動調整補償功率，在低風速下表現最穩定。整體而言，高風速以 Torque 與 AI 最佳化慣量控制效果最佳，低風速則以 ATFS 兼顧頻率與轉速安全。

未來將利用 AI 動態調整控制增益，並搭配轉速恢復控制，於動能釋放與轉速安全間取得平衡；同時優化 ATFS 補償邏輯，使其在低風速下仍具支援能力，以達成智慧化控制，提升風機於不同運行條件下的頻率支援效果與轉速穩定性。

	torque I	torque II	torque III	TFS I	TFS II
頻率最低點 (Hz)	58.9251	59.0288	59.0143	58.7614	58.9487
轉速最低點 (p.u.)	0.9025	0.7920	0.8704	1.0387	0.9584
功率最高點 (MW)	96.1944	105.8975	103.8631	82.4632	100.9959
	ATFS I	ATFS II	ATFS III	Time droop	droop+inertial
頻率最低點 (Hz)	58.7462	58.7872	58.8458	58.9791	59.0480
轉速最低點 (p.u.)	1.0290	1.0267	1.0098	0.8769	0.7872
功率最高點 (MW)	97.7524	95.1280	96.6927	107.5670	107.7432

表 (二)

	torque I	torque II	torque III	TFS I	TFS II
頻率最低點 (Hz)	58.8951	58.9200	58.8973	58.6147	58.7337
轉速最低點 (p.u.)	0.6908	0.6254	0.6908	0.8399	0.7871
功率最高點 (MW)	66.8778	69.5699	67.2759	43.5832	53.3856
	ATFS I	ATFS II	ATFS III	Time droop	droop+inertial
頻率最低點 (Hz)	58.686	58.7170	58.7639	58.7635	58.9053
轉速最低點 (p.u.)	0.8066	0.8023	0.7834	0.6810	0.7001
功率最高點 (MW)	60.0492	58.5186	60.3833	65.2236	71.7123

表 (三)