



主被動風機調頻控制策略研究

學生：張浣愉、陳政安

指導教授：吳元康 教授

摘要

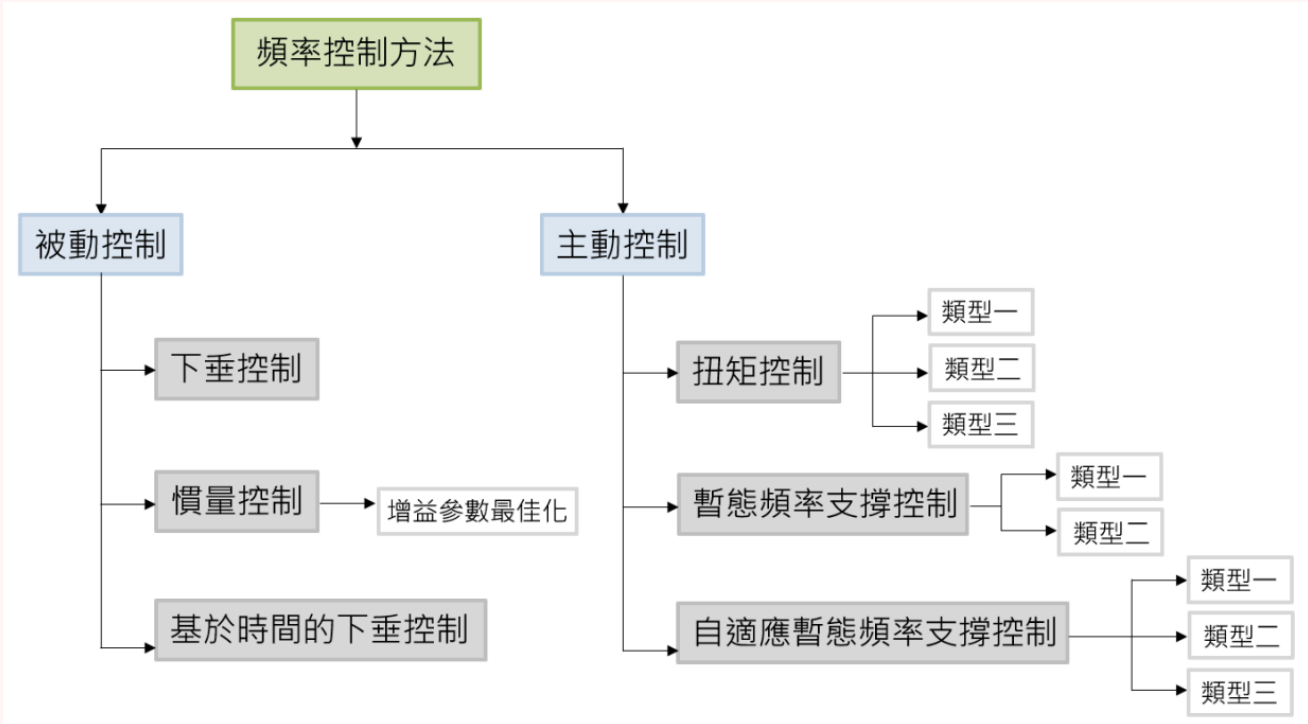
本專題研究比較多項風機暫態調頻策略，包括下垂控制、傳統慣量控制、扭矩功率控制，以及提出的 TFS 與 ATFS。此外，利用分段多項式、ANN 與 XGBoost 建立 AI 模型，依風速預測傳統慣量控制最佳增益參數 ($k_{inertial}$ 、 k_{droop})，以提升在跳機事故下的頻率支援效果。結果顯示，AI 最佳化增益能提升頻率最低點並維持風機轉速於安全範圍，優於固定參數的控制方式。

實作方法

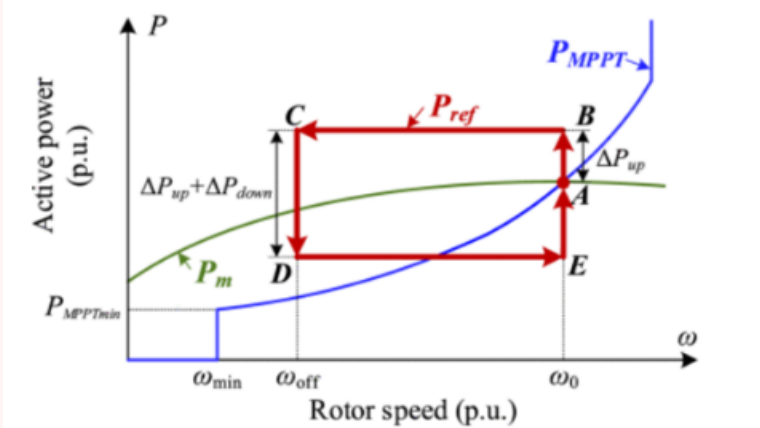
本研究於 PSCAD 建立 6-bus 系統，模擬風機在跳機事故下的暫態調頻行為。風機調頻控制策略（圖一），主要分為主動與被動控制兩大類。

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。

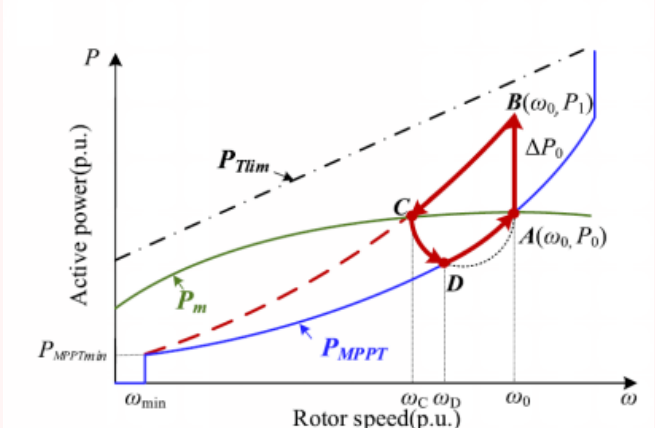
被動控制部分，傳統慣量控制架構（圖四），其中 $-K$ 與 $-1/R$ 分別對應 $k_{inertial}$ 與 k_{droop} 增益參數。由於固定增益無法適應不同風速，本研究以批次模擬掃描風速 7~10 m/s（限制安全轉速 ≥ 0.7 p.u.），建立最佳增益資料庫(約 40 筆資料)，並在 PYTHON 中以分段多項式、ANN 與 XGBoost 建立「風速 \rightarrow 最佳增益」預測模型，以 normalized RMSE 評估（表一），紅字為表現最佳之模型。結果顯示，無論風速高低，四次多項式在 $k_{inertial}$ 皆具有最低誤差；而 k_{droop} 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。



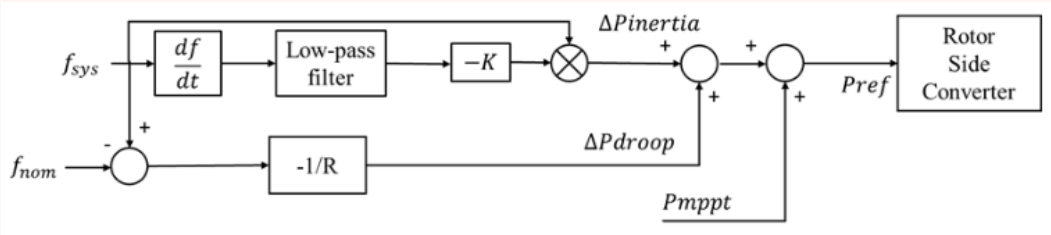
圖（一）



圖（二）



圖（三）



圖（四）

| Target | Model | ≤9 m/s Train nRMSE | ≤9 m/s Test nRMSE | >9 m/s Train nRMSE | >9 m/s Test nRMSE |
|------------|------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| k_inertial | Polynomial | 4.31% (Quartic) | 2.62% (Quartic) | 2.65% (Quartic) | 3.91% (Quartic) |
| | ANN | 4.20% ± 0.53% | 5.37% ± 2.17% | 2.91% ± 0.79% | 4.88 % ± 1.59% |
| | XGBoost | 4.76% ± 2.25% | 7.90% ± 2.38% | 2.97% ± 1.24% | 5.57% ± 2.53% |
| k_droop | Polynomial | 1.10% (Quartic) | 0.74% (Quartic) | 3.45% (Quadratic) | 9.44% (Quadratic) |
| | ANN | 1.94% ± 0.19% | 2.38% ± 1.28% | 4.02% ± 0.99% | 4.90% ± 3.25% |
| | XGBoost | 2.20% ± 2.49% | 5.15% ± 3.52% | 3.22% ± 1.55% | 6.11% ± 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）