

出國報告（出國類別：開會）

參加 IEEE SmartGridComm 2024
智慧電網通訊國際會議

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：蘇亮宇 電機工程專員

派赴國家/地區：挪威

出國期間：113年9月15日至113年9月22日

報告日期：113年11月19日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

參加 IEEE SmartGridComm 2024 智慧電網通訊國際會議

頁數 44 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司人力資源處/翁玉靜/ 02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

蘇亮宇/台灣電力公司/綜合研究所/電機工程專員/02-23601225

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 開會 6 其他

出國期間：113 年 9 月 15-22 日

派赴國家/地區：挪威

報告日期：113 年 11 月 19 日

關鍵詞：Cybersecurity、EV、PMU、電力線通訊

內容摘要：(二百至三百字)

本次參加第 15 屆 IEEE 智慧電網通訊、控制和計算技術國際會議 (SmartGridComm 2024)，此會議圍繞著五個主題接受論文投稿，分別是「控制與運轉」、「資料分析與運算」、「通訊與網路」、「網路實體安全」以及「電力線通訊與其應用」，其中「電力線通訊與其應用」是隨著 ISPLC(電力線通訊國際座談會)合併到本次會議中而增加的。

SmartGridComm 2024 為來自產業、政府機關、學術單位、研究機構的從業人士提供交流想法、探討技術並分享與智慧電網相關經驗的平台。

配合本公司數位轉型方針，本次會議各項主題對公司未來發展具有重要參考價值。在眾多論文與演說發表中，又屬 Cybersecurity、EV、PMU 等議題收穫最多，相關細節詳見此報告會議內容。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw>)

目錄

壹、目的與行程說明	1
一、緣由與目標	1
二、行程說明	1
貳、會議內容	2
一、KEYNOTE SPEECH	5
(一) Decarbonization of Energy Systems	5
(二) G3-Alliance	11
二、CYBERSECURITY 相關之論文	13
(一) 以機器學習辨識針對 IEC 61850 數位變電所的資訊攻擊... ..	13
三、EV 相關之論文	20
(一) 中國 EV 與 V2G 發展概況	20
(二) 車對車充電情境探討	22
(三) 公共智慧充電之改善	24
四、PMU 相關之論文	30
(一) WAMS 應用於系統震盪監測	30
(二) 一種 μ -PMU 設計	34
參、心得與建議	41
肆、參考文獻	43

壹、目的與行程說明

一、緣由與目標

IEEE 智慧電網通訊國際會議 SmartGridComm™(全名：IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grid)固定每年秋季舉辦國際會議，曾在 2012 年在台南由成功大學主辦。今年為第 15 屆 IEEE 智慧電網通訊國際會議 (SmartGridComm 2024)，將於 9 月 17 日到 20 日在挪威奧斯陸舉辦，由奧斯陸大學主辦。此會議圍繞著五大主題接受論文投稿，分別是「控制與運轉」、「資料分析與運算」、「通訊與網路」、「網路實體安全」及「電力線通訊與其應用」，經審稿後接受其中 100 篇並安排文章作者於會議期間進行口頭報告。

本次選送出國之蘇員主要辦理分散式能源資通訊整合與分析業務，與此會議主題高度相關，預期在會議中可以見聞各國先進之研究成果，將對公司未來發展提供重要參考依據。

二、行程說明

本次前往挪威奧斯陸 Thon Vika Atrium 飯店參加 IEEE SmartGridComm 2024 智慧電網通訊國際會議，個人行程如表 1，可對照表 2 研討會議程。

表 1 研討會個人行程說明

日期	行程內容
17 日	論文發表: <u>Cybersecurity</u>
18 日	Keynote: <u>Decarbonization of Energy Systems</u> Keynote: <u>G3-Alliance</u> 論文發表: <u>Electric Vehicle</u>
19 日	論文發表: <u>WAMS application to system oscillation</u>
20 日	論文發表: <u>μ-PMU</u>

貳、會議內容

表 2 研討會議程

DAY 1 ((SEP 17, 2024)	
TIME	EVEN
09:00-10:30	Tutorial 1: Cutting-Edge Enablers for a Sustainable Evolution towards 5G and Beyond
	Tutorial 2: Distributed Control Strategies for Resilient Power Grid Operations: Advancing Smart Grid Resilience in the Era of Decentralization
	Workshop 1: Digital Twin for Smart Grid Keynote/Panel Session: Recent Progress in Smart Grid Digital Twins Paper presentation Session 1: Digital Twin for the Smart Grid
10:45-12:00	Tutorial 1: Cutting-Edge Enablers for a Sustainable Evolution towards 5G and Beyond Networks
	Tutorial 2: Distributed Control Strategies for Resilient Power Grid Operations: Advancing Smart Grid Resilience in the Era of Decentralization
13:00-14:30	Tutorial 3: Safe Reinforcement Learning for Smart Grid Control and Operations
	Workshop 2: Session 1: Distribution Grid Operation and Energy Pricing Mechanisms
	Workshop 3: Session 1: Forecasting and Grid Planning
15:00-16:30	Tutorial 3: Safe Reinforcement Learning for Smart Grid Control and Operations
	Workshop 2 Session 2: Load Profile and Demand Response Management
	Workshop 3, Session 2: Resilience and Security
DAY 2 (SEP 18, 2024)	
TIME	EVENT
09:50-	Keynote 1: Decarbonization of Energy Systems

10:35	
11:15-12:00	Keynote 2: Enhanced Grid Management with G3-Hybrid: Insights and Innovations
13:00-14:30	Control & Operations, Session 1: Microgrid and Energy Management
	Cyber Physical Security, Session 1: Cyber-Physical Security for Distributed Energy Resource
	PLC and its Applications, Session 1: Channel & EMC Characterization and Modeling
15:00-16:30	Control & Operations, Session 2: Vehicle-to-Grid (V2G) and Vehicle Energy Management
	Data Analytics & Computation, Session 1: Energy Management
	Communication and Networking, Session 1: 5G and Beyond for the Smart Grid
DAY 3 (SEP 19, 2024)	
TIME	EVENT
09:30-10:15	Keynote 3: Data Security and Privacy in Smart Grid Services and Applications
10:15-11:00	Keynote 4: PRIME Hybrid, a Tested Solution and its Evolution
11:30-13:00	Control & Operations, Session 3: Power System Optimization and Control
	Data Analytics & Computation, Session 2: Monitoring and Visualization
	Cyber Physical Security, Session 2: Security and Privacy Risk Assessment, Measurement and Management
14:00-15:30	Panel 1: The Role of PLC in Addressing Future Requirements of the Smart Grid: Integrating Metering and Flexibility Services through AI and Edge Computing
16:00-	Control & Operations, Session 4: Ancillary Services and System Resilience

17:30	Data Analytics & Computation, Session 3: Electricity Market
	Communication and Networking, Session 2: Capacity and Network Planning, Resource and Service Discovery
DAY 4 (SEP 20, 2024)	
TIME	EVENT
	Control & Operations, Session 5: Energy Market and Management
09:00-	PLC and its Applications, Session 2: PLC Applications
10:30	Communication and Networking, Session 3: Physical and MAC Layer Protocols including Beyond Fifth Generation (B5G), 6G and Machine Type Communication (MTC) Wireless Technologies
	Dissemination Session
11:00-	Data Analytics & Computation, Session 4: Data Mining for ML/DL
13:00	Cyber Physical Security, Session 3: Secure and Resilient Communication Architectures for Data Acquisition and Monitoring

上述研究主題涵蓋「控制與運轉」、「資料分析與運算」、「通訊與網路」、「網路實體安全」以及「電力線通訊與其應用」，除電力線通訊外，皆與目前本研究室研究項目相關。詳細議程表請見：

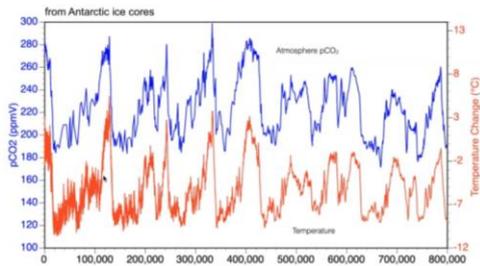
<https://sgc2024.ieee-smartgridcomm.org/program/smartgridcomm-2024-program-arrangements/program-detail>

一、 Keynote Speech

(一) Decarbonization of Energy Systems

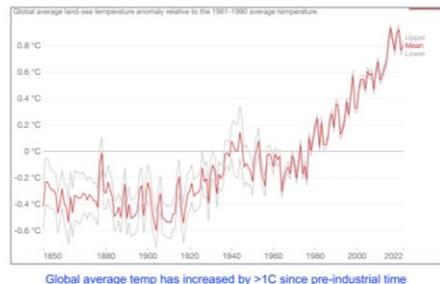
來自 Caltech 的 Steven Low 教授發表演說。從數十萬年間地球溫度起落與大氣二氧化碳濃度升降呈現高度相似性開始，帶到過去半個世紀，隨著人類產業發展，地球平均氣溫已從 1970 年代的 -0.2°C 上升至 2020 年代的 0.8°C ，同時大氣中的二氧化碳也持續增加。

CO2 and temperature



[Lisa Adams, Caltech, CS179, 2022]

Average temperature



https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions

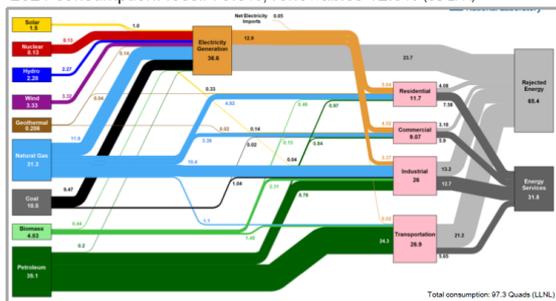
圖 1 二氧化碳濃度與全球平均氣溫之關聯[1]

過去一個世紀，隨著各國經濟發展，生產更多車、發更多電，二氧化碳排放也隨之提高，如圖 2。因此，交通電氣化與發展再生能源發電益發重要。

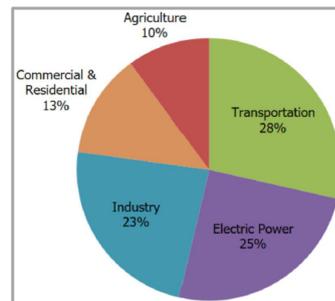


Electricity gen & transportation

2021 consumption: fossil 79.0%; renewables 12.5% (US EPA)



https://flowcharts.llnl.gov/sites/flowcharts/files/2022-09/Energy_2021_United-States.pdf



https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#transportation

Electricity generation & transportation in US:

- Consume 65% of all energies in 2021 (US EPA)
- Emit 53% of all greenhouse gases in 2021 (US EPA)

both numbers are lower than 2019 numbers by only ~2% !

圖 2 美國 2022 年以交通(28%)與發電(25%)為主要碳排來源[1]

隨著再生能源的技術發展，PV 與陸域風電的發電成本都在逐年下降，如圖 3，其中 PV 發電成本從 2009 年到 2019 年降了 89%，陸域風電則是 70%。由於再生能源發電的不穩定，帶動鋰電池技術的發展，因此鋰電池的成本從 1990 年至今下降了 99%；將橫軸換成電池容量市場亦可看出，市場越大成本越低，如圖 4。

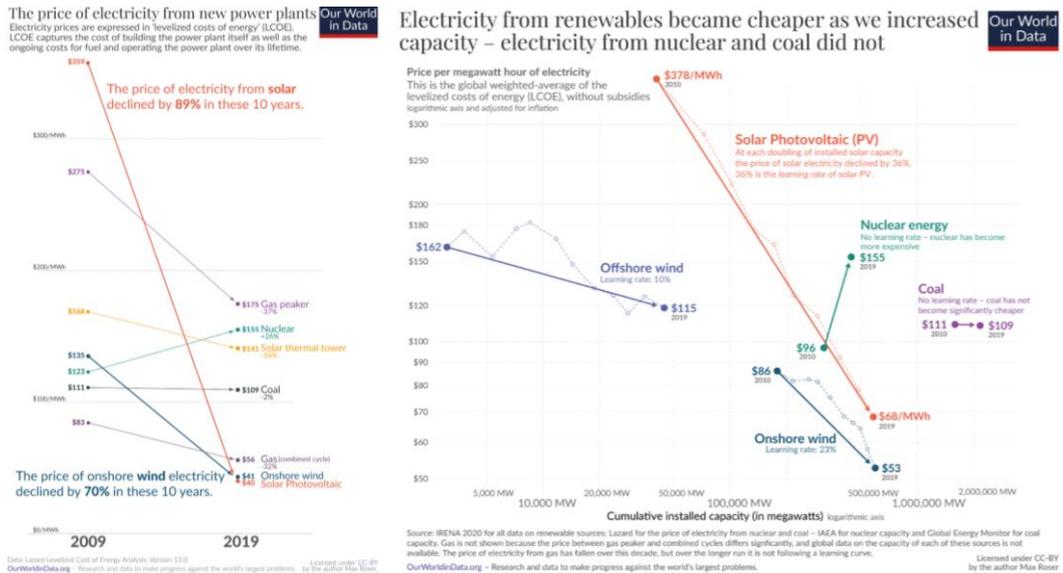
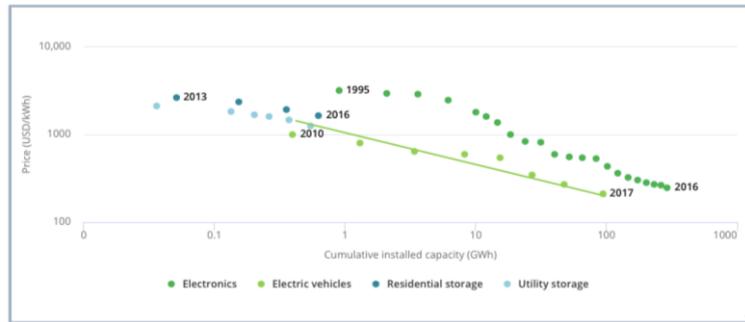
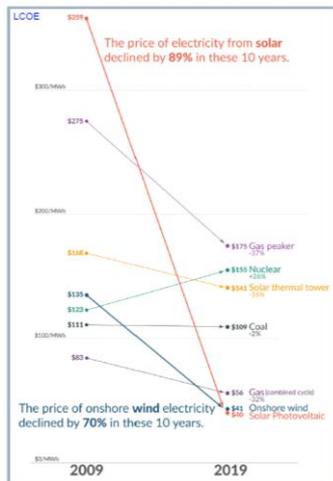


圖 3 再生能源成本下降(左：逐年下降)(右：隨裝置容量增加而下降)[2]

Electricity cost



Li-ion battery cost

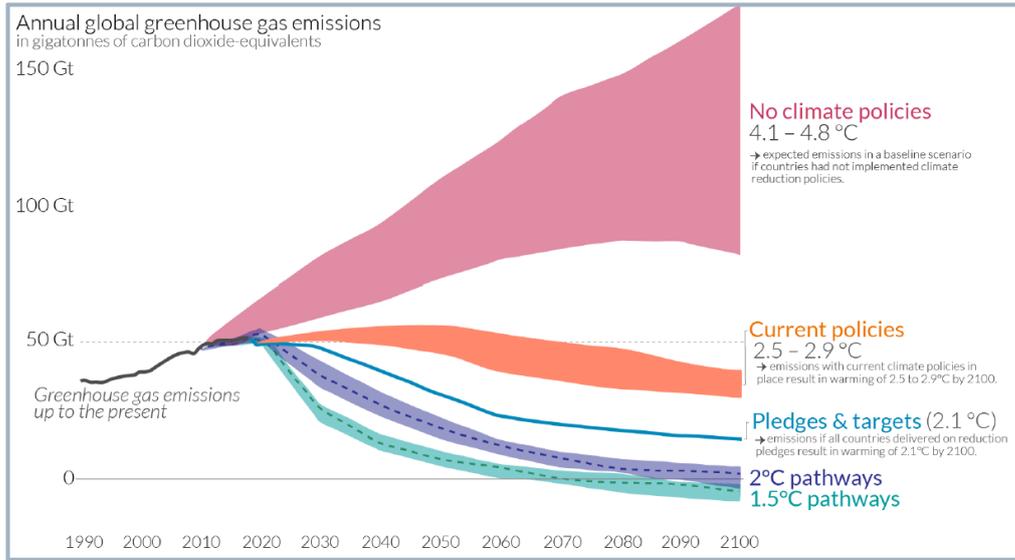


- Electric vehicle battery:**
- 2010: \$1,000 / kWh
 - 2016: \$ 275 / kWh
 - 2030e: \$ 73 / kWh (Bloomberg New Energy Finance 2016)

Source: <https://www.iea.org/geo2018/>

圖 4 鋰電池成本下降(左圖縱軸 kWh，橫軸年)(右圖縱軸 kWh，橫軸市場規模 GWh)[1]

在十到二十年前，沒有推出氣候法案的時候，多數人認為趨勢會走向絕望的「上升 4.1-4.8°C」情境，幸好現在主流認為未來會落在「上升 1.5-2°C」的情境，如圖 5。現在世界主要碳排大國(這些國家碳排量總和占全球 83%)已經達成在本世紀中葉淨零碳排的共識，證明年輕一代足夠在乎減碳議題。



<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>

圖 5 21 世紀預期平均溫度變化[1]

趨勢與挑戰：以下分別就電力系統與交通電氣化兩個議題進行討論。

電力系統有許多可以發展的議題，其中一個 Low 教授及其學生鑽研的議題是「最佳化電力潮流(Optimal Power Flow, OPF)」問題。首先，OPF 是一個限制條件下的最佳化問題(Constraint Optimization Problem)，其非凸(non-convex)、非線性特性造成計算上的挑戰，此特質呈現在計算複雜度上，使 OPF 成為一個 NP Hard 問題，如圖 6。因此理論上 OPF 很難求出解析解；然而實務上，透過辦確定鬆弛法，卻可以很簡單得到結果，而且(以牛頓-拉夫森法)藉由局部邊界條件得到的局部近似解通常在全域也有一定的適用性。

Optimal power flow

OPF problem underlies numerous applications

- nonlinearity of power flow equations → nonconvexity

Ian Hiskens, Michigan

OPF hardness: summary

OPF is nonconvex & NP hard

OPF is "easy" in practice

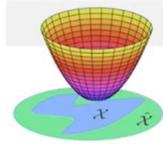
- Semidefinite relaxations often exact
- Local algorithms often globally optimal

圖 6 最佳化電力潮流問題(OPF)[3]

No spurious local optima

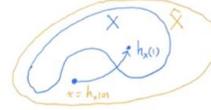
$$\begin{array}{ll} \underset{x}{\text{minimize}} & f(x) \quad f: \text{continuous, convex} \\ \text{subject to} & x \in X \quad X: \text{compact, nonconvex} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Convex relaxation:} & \underset{x}{\text{minimize}} \quad f(x) \\ \text{subject to} & x \in \hat{X}, \quad \hat{X}: \text{compact, convex}, X \subseteq \hat{X} \subseteq K^n \end{array}$$



No spurious local optima

Definition: A path from $x \in \hat{X} \setminus X$ to X is a continuous function $h_x: [0,1] \rightarrow \hat{X}$ such that $h_x(0) = x$ and $h_x(1) \in X$



Lemma [Zhou 2020]

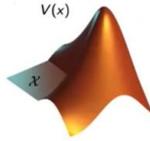
(2) is exact $\Leftrightarrow \forall x \in \hat{X} \setminus X$ there is a path h_x from x to X such that

- $f(h_x(t))$ nonincreasing in t
- $f(h_x(1)) < f(h_x(0))$

No spurious local optima

Definition: A Lyapunov-like function is a continuous function $V: \hat{X} \rightarrow \mathbb{R}_+$ such that

$$V(x) \begin{cases} = 0 & x \in X \\ > 0 & x \in \hat{X} \setminus X \end{cases}$$



No spurious local optima

Standard Lyapunov function

- Dynamical system: $\dot{y} = f(y(t))$
- Global asymptotic stability: $y(t) \rightarrow y^*$
- Stability certificate: Lyapunov function $V(y)$ s.t.
 1. $V(y) > 0$ if $y \neq y^*$, $= 0$ if $y = y^*$
 2. $V(y(t)) < 0$ along trajectory $y(t)$

Our case (dynamical system replaced by optimization)

- Trajectory (path $y(t) = h_x(t)$) is not specified
- Goal is to enter X : $x = y(0) \rightarrow y(1) \in X$
- Lyapunov-like $V(y)$ s.t.
 1. $V(y) > 0$ if $y \neq y^*$, $= 0$ if $y = y^*$
 2. C1: $V(y(t))$ non-increasing along trajectory $y(t)$
- Cost $f(y(t))$ must be non-increasing along $y(t)$ and $f(y(1)) < f(y(0))$

No spurious local optima

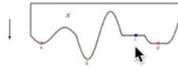
Conditions: \exists paths $\{h_x: x \in \hat{X} \setminus X\}$ and a Lyapunov-like function V such that

- C1: both $f(h_x(t))$ and $V(h_x(t))$ are non-increasing for $t \in [0,1]$, and $f(h_x(0)) > f(h_x(1))$
- C2: $\{h_x: x \in \hat{X} \setminus X\}$ is uniformly bounded and uniformly equicontinuous
- C3: $\exists k > 0$ such that $f(h_x(t)) - f(h_x(s)) \geq k \|h_x(t) - h_x(s)\|$

Local algorithm may converge to any local optimum:

Examples

Global optimum (g.o.): b
Pseudo local optimum (p.l.o.): c
Genuine local optimum (g.l.o.): a, d



- C1, C2 eliminate genuine local optimal (a, d)
- C3 eliminates pseudo local optimum (c)

Conditions: \exists paths $\{h_x: x \in \hat{X} \setminus X\}$ and a Lyapunov-like function V such that

- C1: both $f(h_x(t))$ and $V(h_x(t))$ are non-increasing for $t \in [0,1]$, and $f(h_x(0)) > f(h_x(1))$
- C2: $\{h_x: x \in \hat{X} \setminus X\}$ is uniformly bounded and uniformly equicontinuous
- C3: $\exists k > 0$ such that $f(h_x(t)) - f(h_x(s)) \geq k \|h_x(t) - h_x(s)\|$

Theorem [Zhou 2020]

- C1, C2 \Leftrightarrow all local optima of (1) globally optimal & (2) exact
- C1, C2, C3 \Leftrightarrow all local optima of (1) globally optimal & (2) exact

Applications: OPF, low rank SDP, ...

圖 7 最佳化解存在的必要條件[3]

細節可以參考 2020 年的論文「Proving global optimality of ACOPF solutions」。

另一個講者參與研究的項目是 Adaptive Charging Network (ACN)，內容是關於大規模 EV 充電。該計畫內容從理論與演算法開發(2016 年以前)、安裝於試行案場進行實際測試(2016 年)，最終做到商業化(2017 年後，在法國電力集團 EDF 的資助下成立 PowerFlex 公司)。

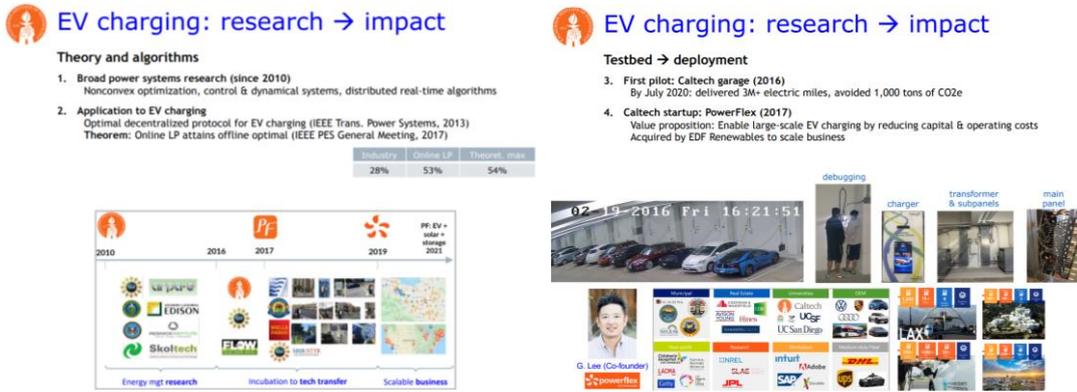


圖 8 大規模 EV 充電研究計畫[1]

測試案場 Caltech ACN 架構如圖 9，其中通訊系統提供用戶手機應用程式介面，使車主開始充電時可以對系統輸入表單，提出包含需求電量、預計取車離開的時間等，而後系統將資料上傳雲端，雲端會每 2 分鐘生成一個 convex quadratic constraint problem 並計算，計算結果會為每台 EV 設定最佳化充電之功率。

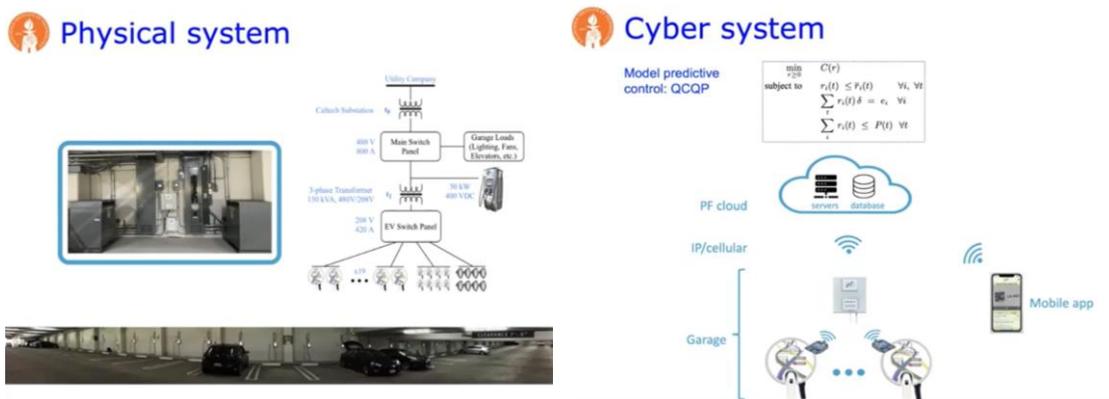


圖 9 測試案場電力系統(左)與通訊系統(右)[1]

此最佳化問題將連同停車場所屬建築物的負載與建築物上裝設的 PV 發電量一併納入考慮，圖 10 所示：



Duck Curve & demand charge

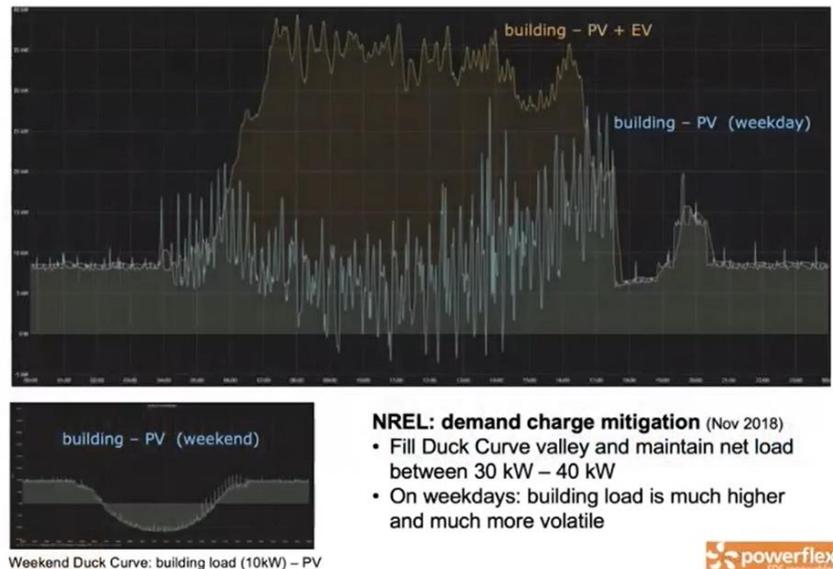


圖 10 測試案場單日負載-PV 發電，以及加上 EV 充電[3]

研究成果的商業意義：加州公共事業公司提供充電設備裝設補助，前提是裝設者接受某些需量反應方案，補助金額可達裝置成本的 70% 以上。此研究成果應可促進這些公司在需量反應方案的執行成效與收益，進一步強化對充電設備的投資動機。

軟體層面：此計畫建置之系統記錄之數據稱為 AC data，可以用於後續分析(ACN-Data)、模擬(ACN-Sim)與即時監測(ACN-Live)。

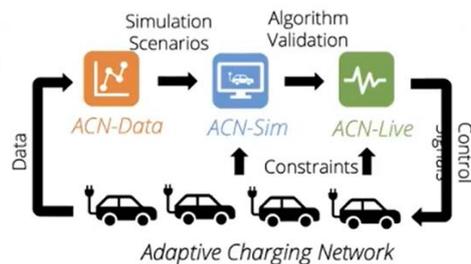


ACN research portal

• ACN-Data

• ACN-Sim

• ACN-Live (HW-in-the-loop)



Lee, Li, Low. ACN-Data: analysis and applications of an open EV charging Dataset
ACM e-Energy, June 2019

Lee, Johansson, Low. ACN-Sim: an open-source simulator for data-driven EV charging research
IEEE SmartGridComm, October 2019

圖 11 軟體層面：ACN apps [3]

(二)G3-Alliance

「Enhanced Grid Management with G3-Hybrid: Insights and Innovations」
[4]由 G3-Alliance (本次大會主要贊助者)的 Cédric Lavenu 以及 Sagemcom 的 Kaveh Razazian 共同擔任此 keynote speech 的講者。

G3-Alliance 的創立可追溯至 2011 年，當時 Enedis (法國最大的配電系統營運商，為法國 95%地區提供服務，講者 Lavenu 原本也是在此服務)為了部屬新世代的智慧電表通訊而催生的組織。G3-Alliance 在創立前便已決定投入電力線通訊(Power Line Communication, PLC)技術的開發，所以一開始組織名稱還叫 G3-PLC Alliance，後來 Enedis 的主要產品「智慧電表 Linky」關聯的基礎建設也導入 PLC 技術，如圖 12，在電表回傳至二次變電所這一段，便是採用 PLC。二次變電所回傳控制中心則是採無線的蜂巢網路。

伴隨 PLC 轉換無線通訊架構的出現，G3-PLC Alliance 也不再將研發範圍侷限於 PLC，將觸角延伸到無線通訊領域，於 2020 年發表 PLC 結合射頻(Radio Frequency, RF)技術的標準，並將 PLC 結合 RF 的技術稱為 G3-Hybrid。時至 2023 年，G3-PLC Alliance 也將組織名稱縮短為 G3-Alliance。

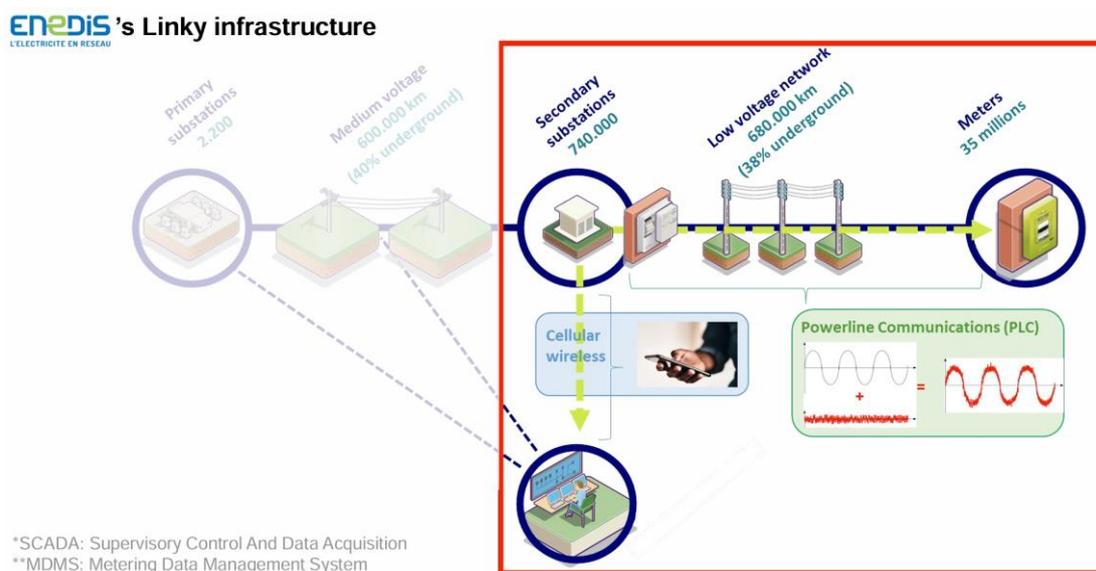


圖 12 Enedis 主要產品「智慧電表 Linky」的基礎建設 [4]

智慧電表過去到現在的轉型：最早期的電表沒有通訊能力的，由抄表人員定期(講者說每個月)抄表才能將資料收集到控制中心。到 20 年前，AMI (講者說 Automatic Meter Intelligence)才發展出 15 分鐘回傳一次的能力。近 10 年內，G3-Alliance 發展出以 PLC 回傳資料到控制中心的成熟技術並制定 PLC 相關的認證，Enedis 也將此技術正式放在智慧電表上運行。再到近 5 年間，G3-Alliance 再推出 G3-Hybrid (PLC & RF)標準化技術與認證產品，且不只是圖 12 的架構，G3-Hybrid 將情境擴展到 PLC 與 RF 互相備援的情境，使得當距離或噪聲(noise)影響 PLC 傳輸效能時可以切換成 RF 傳輸。

智慧電表未來的轉型如圖 13 所示，其中以下三點較值得關注：

1. 隨著表後分散式能源數量變多、容量變大，智慧電表將作為控制中心間接控制表後資源的窗口(閘道器)，屆時智慧電表將扮演雙向傳遞資訊之中介。
2. 隨著 AI 迅速發展，大量資料將被用於訓練模型，然而若將未經處理的資料直接上傳將會使網路壅塞，也會使資料中心消耗大量運算效能。因此在智慧電表進行預處理(pre-processing)後再上傳的作法勢在必行，此機制又稱為邊緣運算(edge computing)。屆時智慧電表將需要搭載運算引擎執行一些 AI 演算法處理數據。
3. 隨著更複雜的商業模式、更多元的通訊方式與更大量的資料傳輸，資訊安全防護也益發重要。

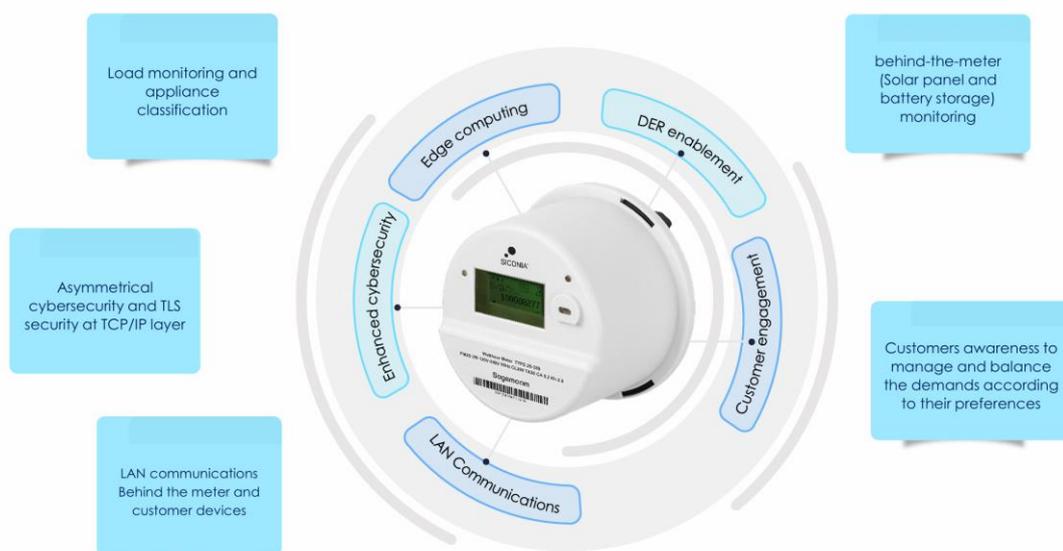


圖 13 未來智慧電表轉型 [4]

二、 Cybersecurity 相關之論文

(一) 以機器學習辨識針對 IEC 61850 數位變電所的資訊攻擊

「Machine Learning-Based Feature Selection for Intrusion Detection Systems in IEC 61850-Based Digital Substations」[5]由德國 Karlsruhe 理工學院(KIT)自動化與應用資訊研究所(IAI)的團隊與 KASTEL Security Research Labs (SRL)合作發表，由 KIT 的 Ghada Elbez 進行口頭報告。

隨著電力系統由傳統電網向智慧電網發展，導入新型資通訊技術一方面使電力監控變得更簡單高效、遠端作業取代現場的人力部屬，另一方面智慧電網卻也成為惡意人士進行網路攻擊的目標，例如 2015 年烏克蘭一家電力公司便因為遭到駭客攻擊釀成大停電，波及人數高達 23 萬人，因此智慧電網關鍵基礎設施「IEC 61850 數位變電所」便有強烈的資訊安全防護需求。

此論文藉由 SRL 提供的 IEC 61850 數位變電所，實際在硬體上針對 IEC 61850 使用的通訊協定進行各種類型的攻擊。將測試平臺收集的攻擊數據用於驗證基於機器學習(Machine Learning, ML)的入侵檢測系統(Intrusion Detection System, IDS)，具體上是將機器學習技術用於辨認攻擊資訊的特徵。團隊使用了一個結合了多種特徵選擇方法的整合模型，以說明一組有限的精心選擇的特徵可以顯著提高 IDS 的分類準確性和效率。這種聚焦方法將分類器注意力引導到有影響力特徵的關鍵子集，從而最佳化其性能。

IEC 61850 數位變電所標準架構如圖 13，由上而下分三個層級(level)：

1. Station Level：有類似 RTU 這類的通訊模組，水平通訊使用 MMS 通訊協定，對下(IED)也是使用 MMS，對上(控制中心、SCADA)使用 IEC 60870-5-104 (圖 13 的 IEC 104)通訊協定。
2. Bay Level：有 IED 這類裝置，IED 間溝通使用 GOOSE 通訊協定。
3. Process Level：有合併單元(Merging Unit, MU)這或其他量測裝置，將量測到的數據以 SV(Sample Values)通訊協定上傳。

以及兩網：

1. Station Bus：介於 Station Level 和 Bay Level 間的乙太網路。
2. Process Bus：介於 Bay Level 和 Process Level 間的乙太網路。

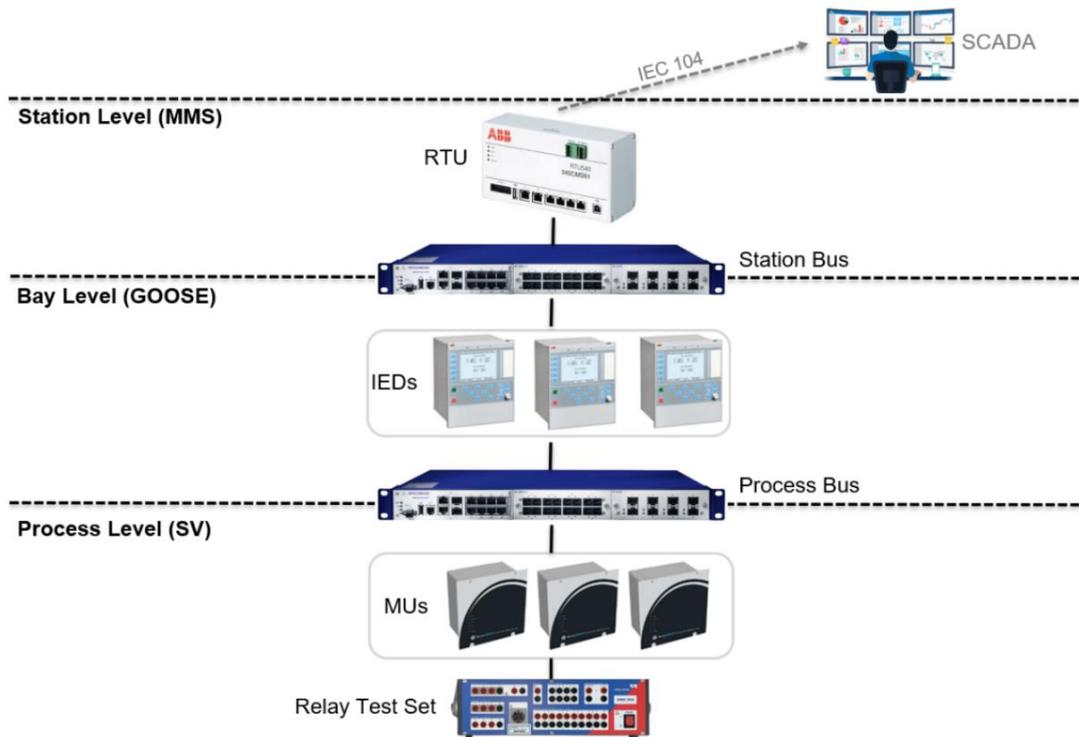


圖 14 IEC 61850 architecture at KASTEL Security Lab Energy [5]

基於機器學習的入侵檢測系統(ML-based IDS)內含多個 ML 演算法，用於監聽 MMS、GOOSE 與 SV 的傳輸封包，依封包特徵(feature)辨別是否為攻擊訊息，判定為攻擊訊息者歸類在「陽性」，反之則為「陰性」。為強化篩選正確率，IDS 通常對同個封包使用多個 ML 演算法進行篩檢。對於 IDS 的能力驗證可依「偽陽性」與「偽陰性」的比率進行分析，IDS 的優劣便取決於訊息判別的正确率。

鑒於 SV 和 MMS 協定的大部分現有工作都是使用人工或基於模擬的數據(Data Set)集進行的，此論文使用真實的變電所設備(RTU 與 IED)生成數據集。此研究目前只針對 SV 和 MMS，並未針對 GOOSE 與 IEC 104 進行干擾。為了支援智慧電網資訊安全領域的進一步研究，研究團隊已在 GitLab 上發佈此研究的數據集和相關文件。

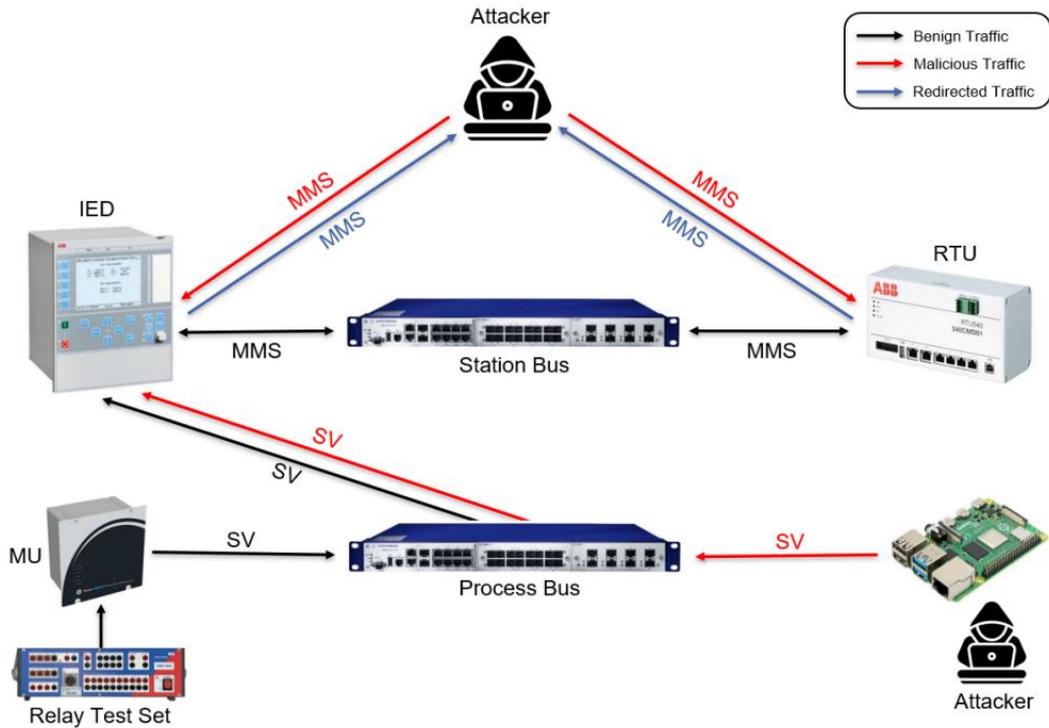


圖 15 Setup for attacks on SV and MMS [5]

攻擊設置：如圖 14 所示，此論文針對 SV 與 MMS 進行攻擊，針對 SV 的攻擊是使用 Raspberry Pi 4 當作攻擊機器，接在 Process Bus，一方面接收 MU 的 SV，另一方面對目標 IED 進行錯假 SV 注入。之所以用 Raspberry Pi 4，是因為相比市售個人電腦，Raspberry Pi 4 能實現更穩定的取樣率，另一個原因是 Raspberry Pi 4 不像個人電腦必須執行許多背景執行程式，CPU 被其他行程占用的機率比較低。注入的錯假 SV 是使用開源 IEC 61850 library 所建構，竄改部分 SV 內的量測資料，如電壓、電流和其他常數。另外，攻擊者可以進行重送(Replay)攻擊，在監聽到一些 SV 後，經過一定時間的延遲，再重發這些 SV 一次或多次。

對 MMS 的攻擊由於沒有效能上的需求，因此使用一般個人電腦即可。攻擊者在 Station Bus 針對 RTU 與 IED 間的通訊進行中間人(Man-in-the-Middle, MITM)攻擊。圖 14 中藍色箭頭代表攻擊者 ARP 欺騙(ARP Spoofing)後將良性封包目的位址改為攻擊者電腦，並以紅色箭頭代表攻擊者對 IED 與 RTU 發送過的封包。這些攻擊旨在操作 MMS 中的跳脫訊號和數據量測值，例如故意將故障訊號改為正常。另外有時間延遲攻擊(扣留封包一段時間再送)以及阻斷服務(Denial-of-Service, DOS)攻擊(直接丟棄攔截的封包)。

Metadata	SV Dataset	MMS Dataset	ERENO Dataset
Features	52	107	53
All samples	112000	2310	2188
Training samples	96000	1617	1094
Test samples	16000	693	1094
Train-Test split	80:20	70:30	50:50
Classes	Normal, Fault, Injection, Replay	Normal, Fault, Modification, Delay	Normal, Fault, Injection, Replay, Masquerade

表 3 SV、MMS 與 ERENO 資料集的 Metadata [5]

SV 資料集：相對其他兩個資料集，SV 資料集具有最多的樣本數，每個樣本對應到一個 SV 訊息，這些訊息包含帶協定特徵的訊息(來源 MAC、目標 MAC、取樣計數器、AppID、識別碼…等)以及帶流量特徵的訊息(相臨時的間隔)。正常 SV 封包間隔 250 μ s。

MMS 資料集：具有最多樣化的特徵，這是因為 MMS 下層堆疊了 TCP/IP 通訊協定，使其增加許多協定特徵；SV 不採 TCP/IP，其下層直接對應到資料連結層的 MAC。MMS 攻擊分類上不同於 SV 資料集，具有修改類別與延遲類別，但沒有注入與重送。此研究配置的 IED 約每 10 秒才送一次 MMS 封包。

ERENO 資料集：開源 ERENO IEC-61850 入侵資料集。此資料集每個樣本對應一條 SV 訊息以及前一個訊息對應的 GOOSE 特徵(電壓電流量測值、斷路器狀態、時戳、序列與狀態編號…等)。ERENO 資料集分類上接近 SV，但多一個 Masquerade 類別。

實驗：使用 ABB 保護電驛(IED)觀察 SV 注入攻擊，當 IED 偵測到超過一個 SV stream 時會使 IED 功能停用。重送攻擊同樣使 IED 功能停用。結果如圖 16 所示，一旦對 IED 進行資料注入攻擊後，IED 停用其 tripping 功能並將所有量測讀值顯示為 0。

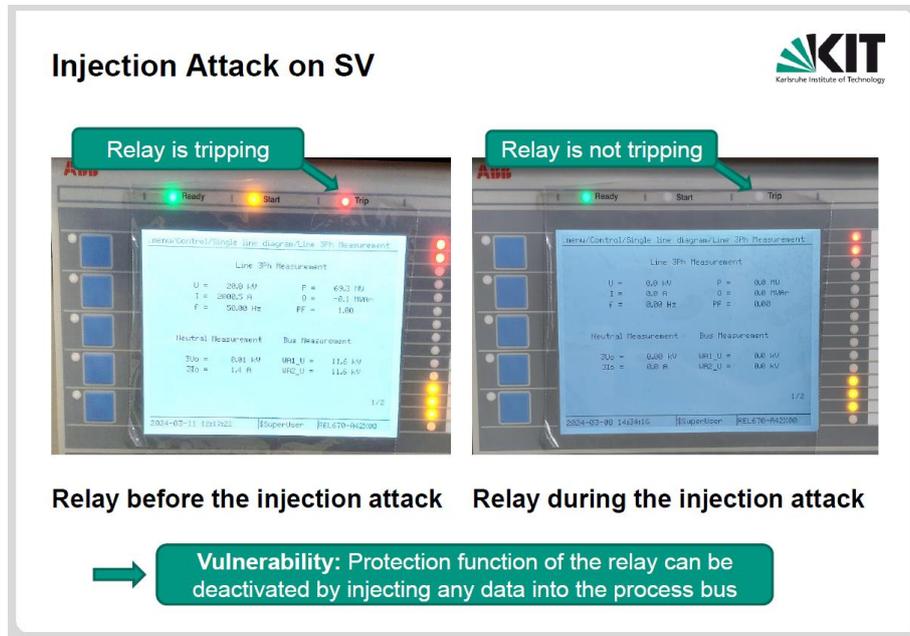


圖 16 IED 並未對資料注入攻擊起反應[6]

對 MMS 的資料竄改攻擊可以在 RTU 網頁介面或使用 IEDScout 模擬器進行觀察。由於 MMS 本身的設計，前述所有針對 MMS 的攻擊方式都奏效。例如竄改攻擊中，將電流故障值改為正常值，網頁介面就顯示竄改過的數值(圖 17)，或將 IED 發出 Trip ON 訊號改為 Trip OFF(圖 18)也能成功；時間延遲攻擊中，網頁介面會等到收到資料再刷新(無 time-out 機制)；在 DoS 攻擊中有兩種結果，網頁介面同樣等不到資料就不刷新，或顯示連線錯誤。在 IEDScout 介面上也一樣，可以同時竄改 IED 的 tripping 訊號，將 ON 改為 OFF，並竄改電壓與電流數值，將故障量測值 11550V 與 2000A(三相電壓電流略有差異)改為正常量測值 20V 與 20A，如圖 19。

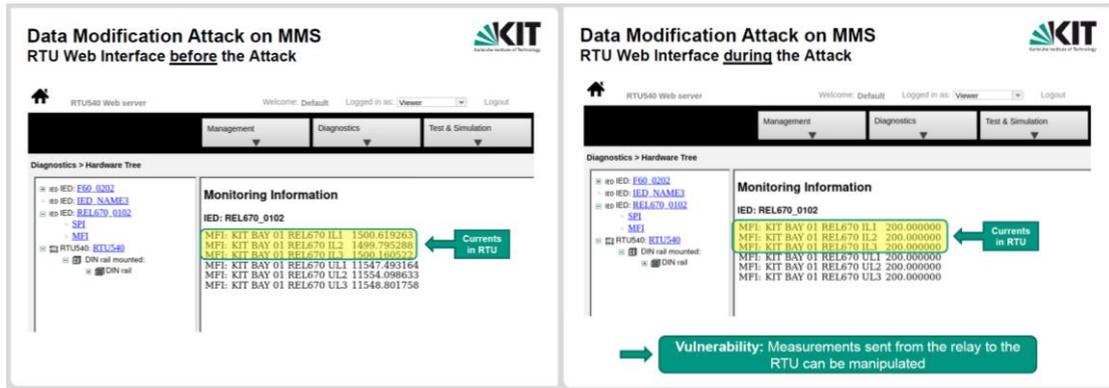


圖 17 在 RTU 網頁介面觀察以 MMS 進行量測資料竄改攻擊[6]

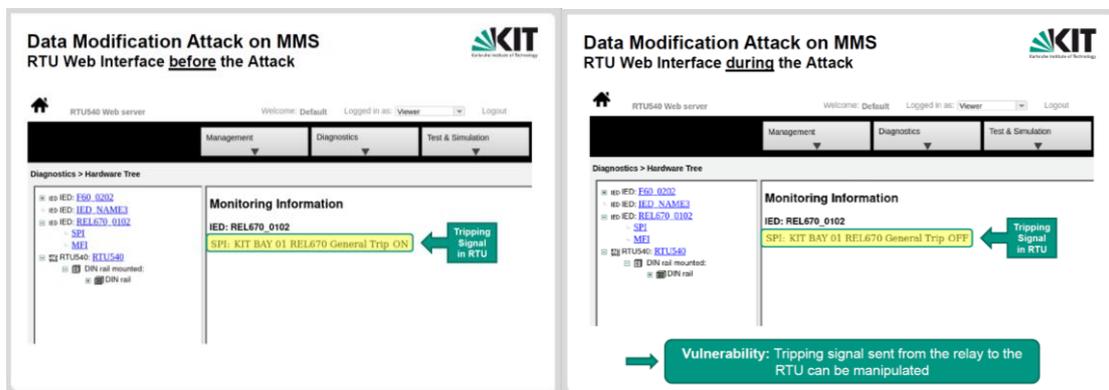


圖 18 在 RTU 網頁介面觀察以 MMS 進行 tripping 訊號竄改攻擊[6]

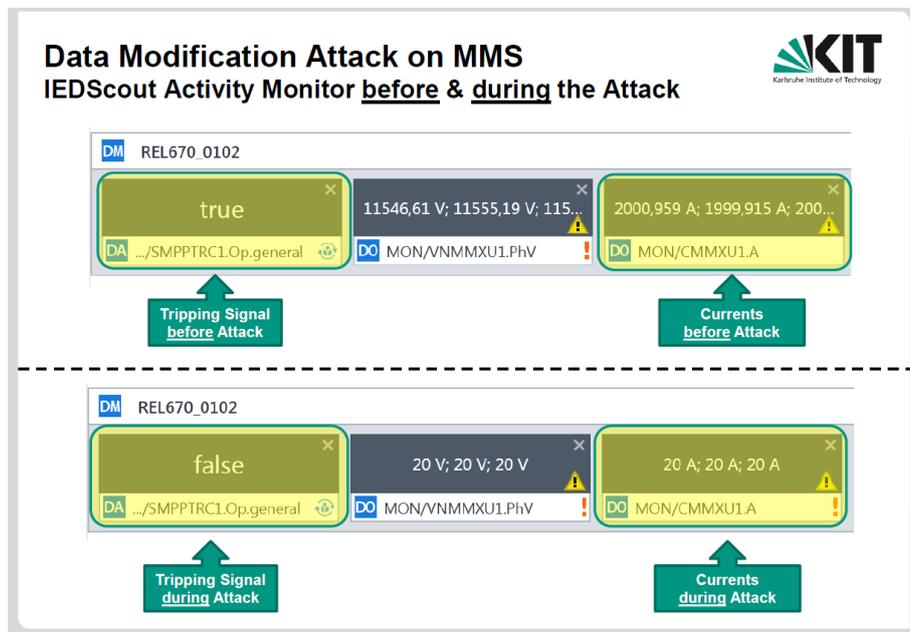


圖 19 在 IEDScout 介面觀察以 MMS 進行量測資料竄改攻擊[6]

Dataset	Accuracy w/o FS	Accuracy with FS	Number of selected Features	Improvement Rate
SV	99.76%	99.91%	10	0.15%
MMS	100%	100%	3	0%
ERENO	99.54%	100%	4	0.46%

表 4 有無特徵選擇(Feature Selection, FS)對於分類精度的差別 [5]

Dataset	Without FS				With FS			
	TP	FP	TN	FN	TP	FP	TN	FN
SV	7970	9	7991	20	7987	2	7998	6
MMS	345	0	231	0	345	0	231	0
ERENO	988	0	101	0	993	0	101	0

表 5 有無特徵選擇(Feature Selection, FS)對於分類精度的差別 [5]

特徵選擇準確性與改進：表 4 呈現有無特徵選擇對於分類精度的差別，可以得知有特徵選擇的確在分類正確性上有所改善，只是因為原本的精確度已經接近 100%導致改善幅度相對測試樣本數稀少。表 5 呈現：陽性(Positive)代表非正常訊息，陰性(Negative)代表正常訊息；真陽性(True Positive, TP)、偽陽性(False Positive, FP)、真陰性(True Negative, TN)、偽陰性(False Negative, FN)。可以看到進行特徵選擇後，確實大幅降低偽陽性(9 個降為 2 個)以及偽陰性(20 個降為 6 個)。

三、EV 相關之論文

(一) 中國 EV 與 V2G 發展概況

「Strategic V2G Trading in Local Energy Market Considering Minimum Energy Requirement」[7]論文由香港中文大學(深圳)人工智能與機器人研究院的團隊所發表。由第一作者 Chenxi Sun 進行口頭報告。

此報告前半部分講述中國的 EV 發展現況。根據國際能源總署 (International Energy Agency, IEA) 公布的數據，過去 10 年全球 EV 數量呈指數增長，此趨勢在中國更是特別顯著。如圖 20 所示，過去幾年中國 EV (淺綠) 指數成長，依此趨勢到 2030 年時便會達到 8 千萬輛，屆時全部 EV 的蓄電容量相當於全中國單日電能消耗的四分之一，很有潛力為負載的尖離峰移轉做出貢獻。



圖 20 中國 EV 的統計數據與發展趨勢[8]

如圖 20 所示，中國 EV 由於電池技術進步與品牌競爭，所以價格正在逐年下降。同時，每台車的蓄電容量也因為技術進步而不斷提升，使得 EV 除了原先日常的交通用途外，仍有剩餘的電能可以參與 V2G。在中國幾個大城市—例如深圳—已經有些充電站安裝雙向電能的充電樁，以促進 V2G 相關試驗。實務上，在區域電能市場進行的 V2G 交易正面臨 2 項挑戰，一是電能交易量基本單位(門檻)相對單一 EV 太高，因此必須聚合才

能交易；二是價金對吸引力還不足以擴大 V2G 市場。此論文便是基於這兩項挑戰所進行的研究，也就是考量成本效益下的 V2G 交易策略。

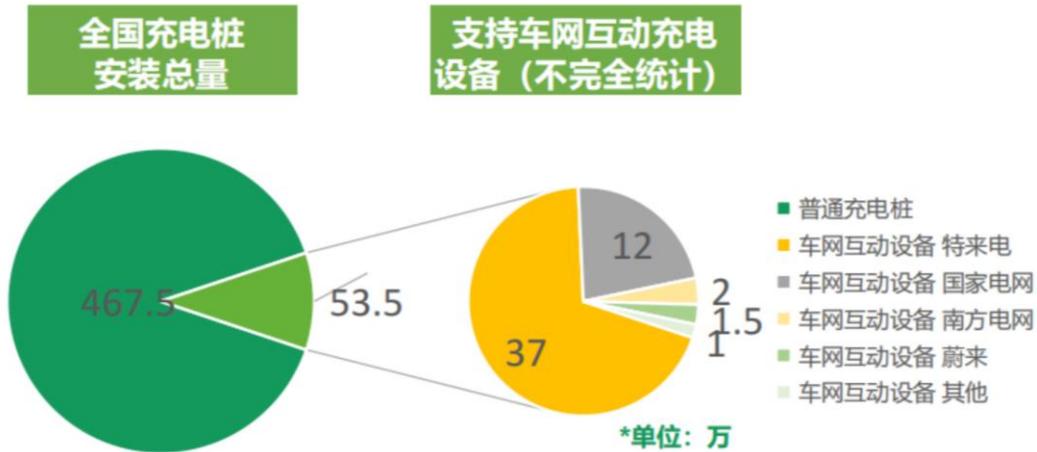


圖 21 中國充電樁支援電網服務之比率[8]

V2G 交易如圖 22 所示，時序上分成日前市場與即時市場；參與角色有：Local Market Operator、Charging Station Operator，以及 EV 車主。在日前市場 Local Market Operator 會先設定各時段 V2G 每度電的價金 \bar{p} ，以及參與者出價下限 D 。Charging Station Operator 需要考慮基本維運成本，在圖 22 中 Stage I 先決定是否參與提供電網 V2G 服務；Stage II 需要對 EV 車主公布該站是否參加 V2G 服務，若是則一併公布收購標價 p ；EV 車主則是在即時市場自行選擇是否參與任一家充電站的 V2G 服務方案。

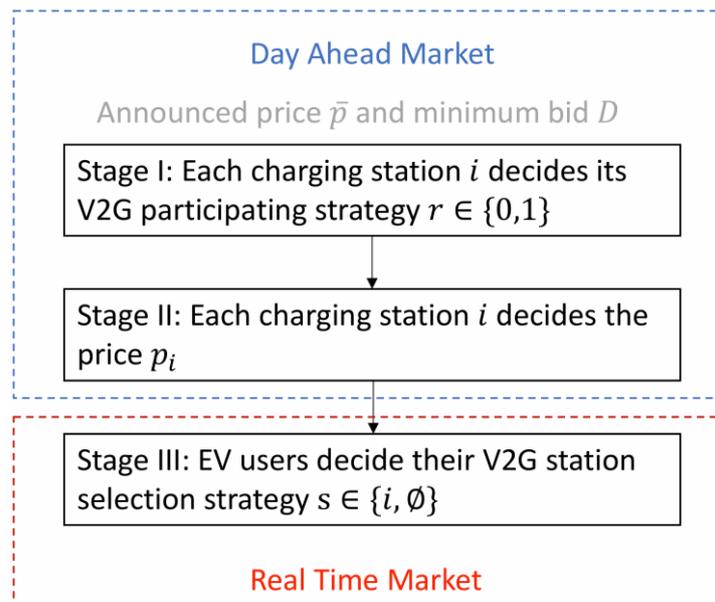


圖 22 V2G 商業模式：三階段決策模型 [7]

關於此商業模式下的最佳化問題探討，請詳見論文內容。

(二) 車對車充電情境探討

「Vehicle-to-Vehicle Charging Model, Complexity, and Heuristics」[9]論文受葡萄牙 Fundação para Ciência e a Tecnologia (FCT)贊助，由美國卡內基美隆大學(Carnegie Mellon University)的研究團隊所發表，並由第一作者 Cláudio Gomes 進行口頭報告。

研究動機：當長途行駛電動車時，車主不得不預先規畫要何時、要在哪裡充電的問題，但充電樁、充電站，乃至於相關的電網基礎設施並不一定能夠匹配 EV 的增長，使得在一些情況下，車對車充電(Vehicle-to-Vehicle Charging, V2VC)變成一個有競爭力的選項。目前已知有些 EV 已支援 V2VC 的功能，例如 Ford F-150 Lightning 以及 Tesla Cybertruck。

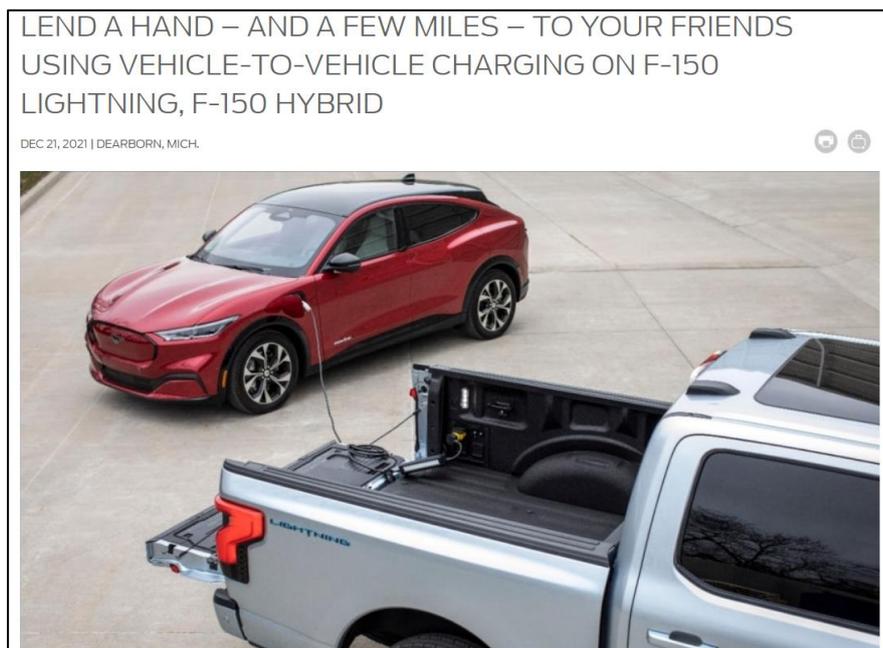


圖 23 車對車充電(V2VC)[10]

此論文探討給定初始條件下的 V2VC 最佳化問題，給定的初始條件為：路網地圖、EV 數量、各 EV 起始位置、各 EV 終點位置、各 EV 的蓄電狀態(State of Charge, SoC)、各 EV 的蓄電量上限、各充電站位置、各充電站供電容量上限、各 EV 執行 V2VC 供電容量上限。

情境描述：如圖 24 及圖 25 所示，

- 在 $t=0$ 時 EV_A 電量全滿位於節點 1，EV_B 電量為 0 位於節點 1，EV_C 電量為 0 位於節點 3。EV_A 先對 EV_B 充電直到 $t=3$ 。
- 在 $t=3$ 時 EV_B 駛離節點 1，為了前往節點 3 對 EV_C 充電。
- 在 $t=4$ 時，EV_B 抵達節點 3 開始對 EV_C 充電，而此時 EV_A 也離開節點 1 前往節點 4。
- 在 $t=5$ 時 EV_A 抵達目的地節點 4、EV_C 結束來自 EV_B 的充電，前往節點 1、EV_B 則停留在原地。
- 在 $t=6$ 時 EV_C 抵達節點 1，此時三台車皆在保有一定程度的電量下抵達目的地。整個過程的每台 EV 的蓄電量如圖 25 所示。

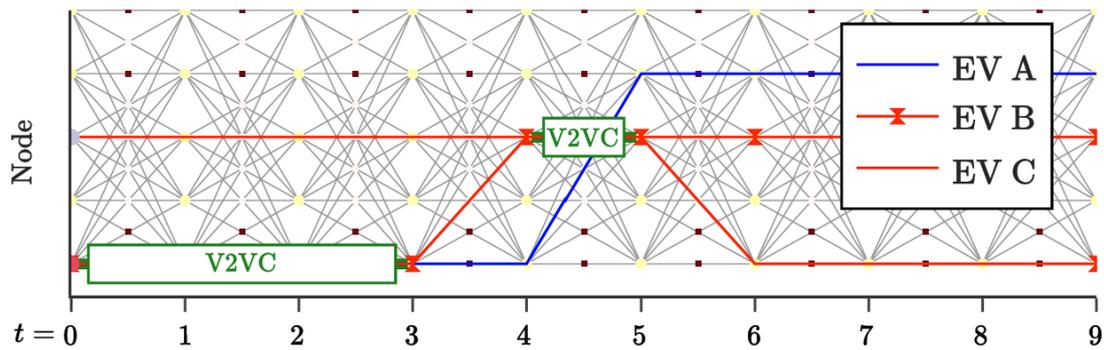


圖 24 時空網路圖(Time-Space Network Graph)，縱軸為節點(地點)，橫軸為時間[9]

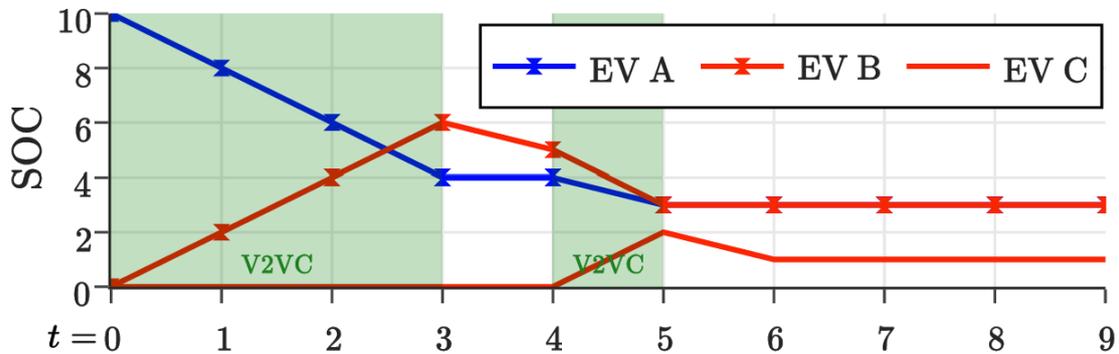


圖 25 蓄電量隨時間變化圖[9]

此論文探討上述情境下，給定時空網路圖、各 EV 起點、終點、起始電量、所有車抵達終點期限 T 等初始條件下，針對整體里程數、或總共剩餘電量、或所有車都抵達終點所花費的時間進行最佳化。此論文首先證明此最佳化問題為 NP-Complete，但作者發現若將題目增加限縮條件「任一輛 EV 在整段行程 T 中，僅可擔任充電方或被充電方其中一個角色」(Restricted-V2VC, R-V2VC)，則可近似得到一個 polynomial time 的解，並在論文後半提出證明。

(三) 公共智慧充電之改善

「Realizing Smart Charging of Electric Vehicles at Public Charging Infrastructures Using Standards-Based Communication Architecture」[11]論文由德國柏林工業大學(Technische Universität Berlin)與相關產業人士組成的團隊所發表。此團隊為 Forschungscampus Mobility2Grid(英譯：Research Campus Mobility to Grid)研究專案的其中一部份。由第一作者 Jan F. Heinekamp 進行口頭報告。

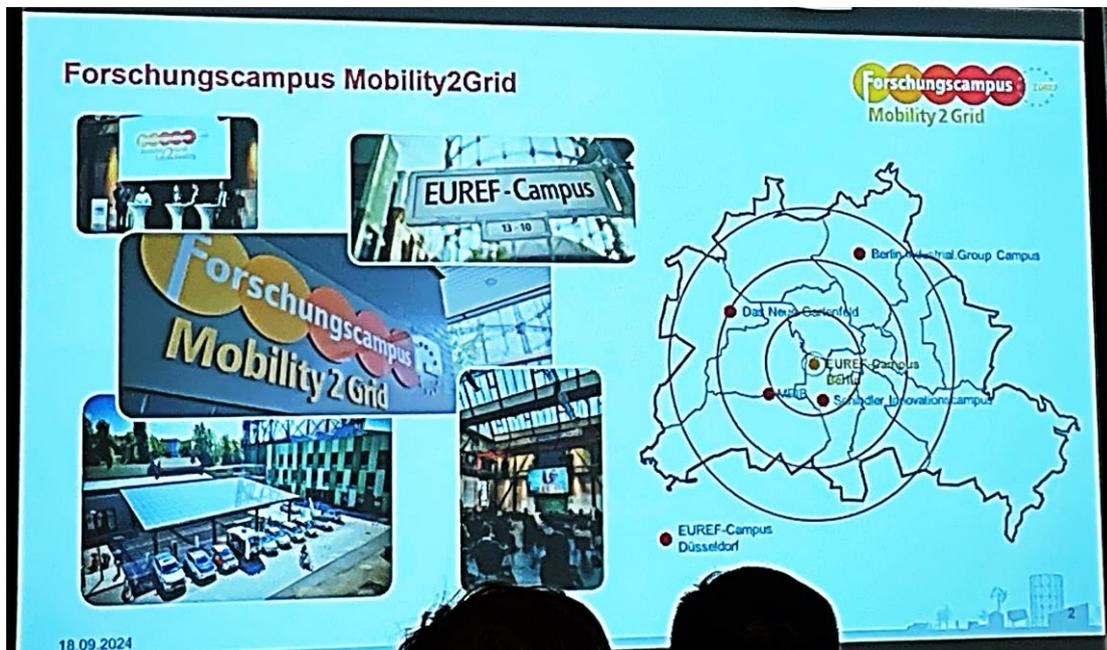


圖 26 Forschungscampus Mobility2Grid (資料來源：講者簡報)

此論文首先介紹公共智慧充電的互動機制，說明現有商業模式造成的資訊不透明；隨後說明未來商業模式將朝資訊公開透明的方向演進，以及開放互充協定(Open InterCharge Protocol, OICP)如何擴充以承載將來公開透明的資訊；最後，藉由實地案場測試充電樁對電動車的充電過程驗證通訊協定 ISO 15118 固有的設計缺陷，導致充電命令與實際充電量不匹配之情形。

公共智慧充電：現今的智慧充電主要設置於私用的表後裝置，但當智慧充電走向公共化，系統就會越來越複雜，此意謂有更多角色與利害關係者加入充電(及其加值應用)市場。以下介紹公共智慧充電下，各角色與利害關係者的交互關係：

- **E-Mobility End User**：電動車車主，可自由選擇要與哪家公共充電服務提供者簽訂契約。
- **E-Mobility Service Provider**：EV 服務供應商，簡稱 EMSP。
- **E-Roaming Platform Operator [Clearing House Operator]**：清算所。收集與處理所有交易紀錄(契約)的單位。
- **Smart Charging Service Provider**：智慧充電服務供應商(SCSP)。資訊聚合者，對充電站發送充電輛設定(set point)資訊，以實現智慧充電(意指最佳化排程)。目前實務上由 VPPO 或 CPO 兼任此角色，但未來仍可能產生獨立單位接管此角色任務，特別是當歐盟管制單位介入後。
- **Infrastructure and Charge Point Operator [Energy End User]**：充電站營運商，一般簡稱 CPO。
- **Virtual Power Plant Operator [Energy Supplier]**：虛擬電廠營運商，簡稱 VPPO，聚合發電設備以提供 CPO 使用之電能，最好是來自再生能源。
- **[Market Platform Operator, Energy Producer, System Operator]**：System Operator：負責提供或使用輔助服務，例如控制儲備容量，以及依電網穩定度進行電能重分配。

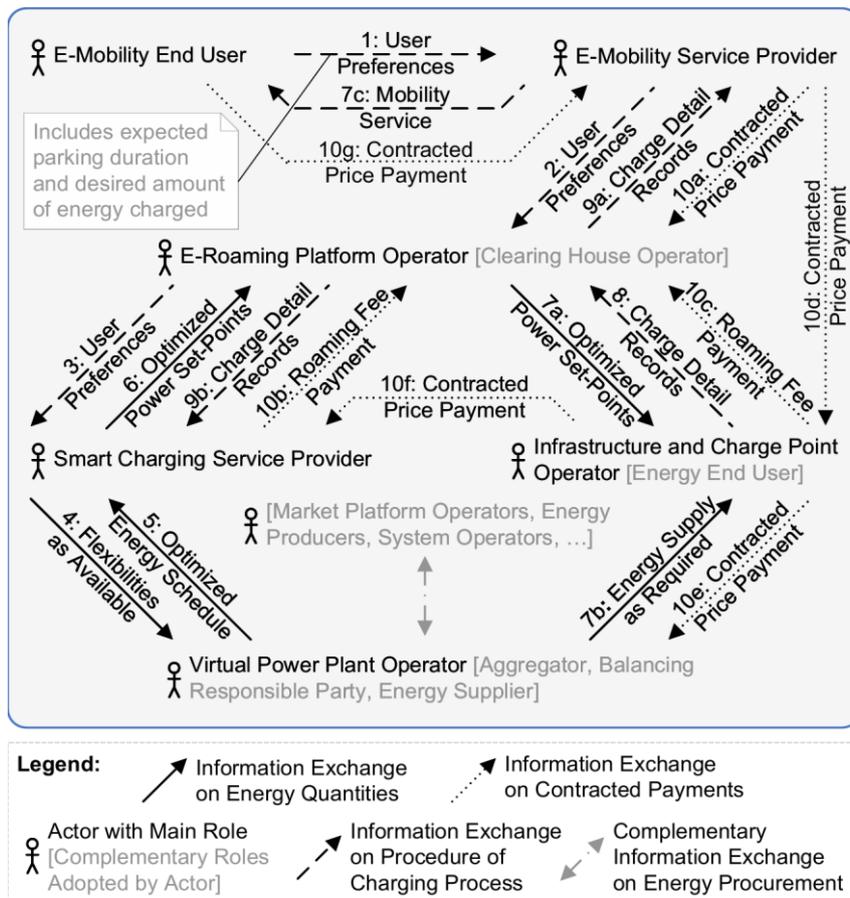


圖 27 公共智慧充電下各角色的互動流程 [11]

圖 27 之資訊交換步驟：

1. (用戶/車主→EMSP)：用戶偏好
2. (EMSP→清算所)：用戶偏好
3. (清算所→SCSP)：用戶偏好
4. (SCSP→VPPO)：可供彈性調整之幅度
5. (VPPO→SCSP)：最佳化電能排程
6. (SCSP→清算所)：最佳化充電設定點
7. a.(清算所→CPO)：最佳化充電設定點
b.(VPPO→CPO)：依需求可提供之電能
c.(EMSP→用戶/車主)：提供計費與其他應用程式服務
8. (CPO→清算所)：充電明細紀錄
9. a.(清算所→EMSP)充電明細紀錄
b.(清算所→SCSP)：充電明細紀錄
10. a.(EMSP→清算所)：合約價金支付
b.(SCSP→清算所)：漫遊費支付
c.(CPO→清算所)：漫遊費支付
d.(EMSP→CPO)：合約價金支付
e.(CPO→VPPO)：合約價金支付
f.(CPO→SCSP)：合約價金支付
g.(用戶/車主→EMSP)：合約價金支付

有別於過去的互動模型，SCSP 作為新增的角色，存在目的即為實現智慧充電。智慧充電需要每個受控的 EV 提供用戶偏好資訊、目標充電狀態，以及 EV 自身的 SoC(為了符合用戶偏好)給 SCSP，但過去 EV 原廠(Original Equipment Manufacturers, OEMs)並未被這麼要求，使得 OEMs 經營的充電站或合夥的 CPO 得以寡佔特定品牌 EV 的智慧充電資訊。

為遏止此寡頭壟斷現象，即將於 2025 年生效的 EU Data Act, Regulation 2023/2854 以及 Renewable Energy Directive (RED III), Directive 2023/2413 將要求 OEM 與授權第三方共用智慧充電相關數據，以促進公平競爭，使其他參與者能夠擔任 SCSP 的角色。

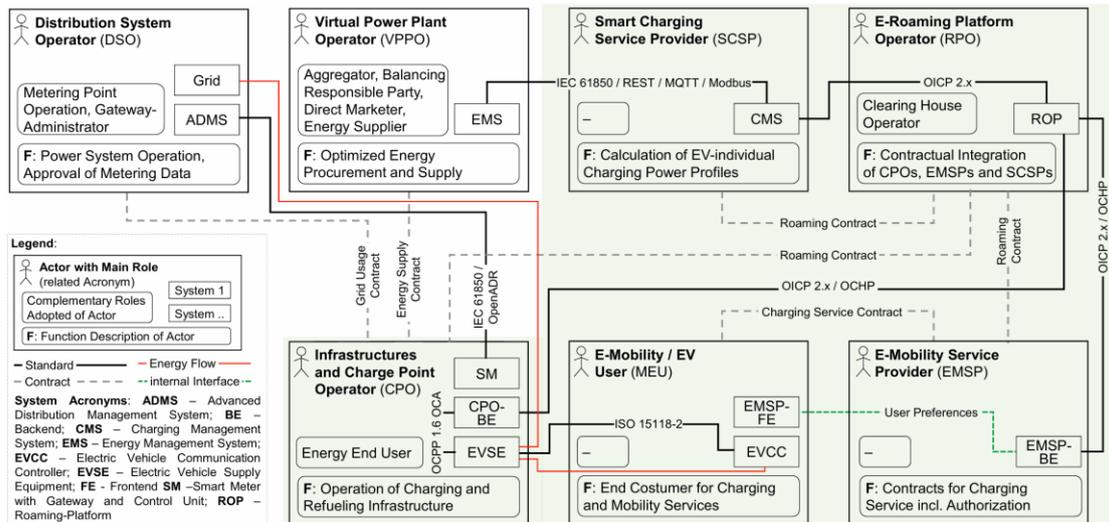


圖 28 公共智慧充電下各角色互動的通訊協定 [11]

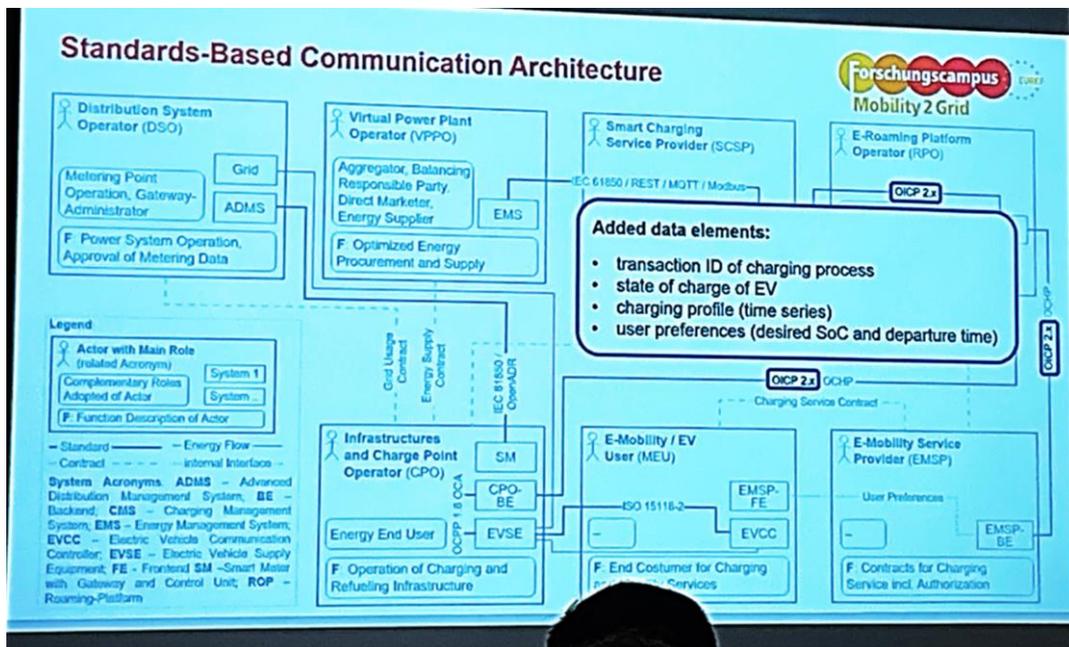


圖 29 擴充 OICP 2.x 以實現智慧充電 (資料來源：講者簡報)

藉由此專案合作夥伴 Hubject(世界最大的漫遊平台營運商，也是 OICP 的主要發展組織)的協助，此研究得以在實驗場域擴充 OICP 2.x 以提供相應的資料，包含合約 ID、SoC、充電配置(充電功率設定點的時間序列)、用戶偏好(用戶所需 SoC 及領車時間)。在 SCSP 收到用戶偏好(圖 27 步驟 3)、最佳化電能排程(圖 27 步驟 5)後，便可規劃出最佳化功率設定點，並將其經過清算所轉發給 CPO(圖 27 步驟 6 與步驟 7a)。擴充 OICP 2.x 使車主得以藉由提供這些資料，參與智慧充電過程。

實測驗證：為驗證通訊基礎設施，此測試的充電設定並非採用最佳化配置，而是一個遍歷所有充電設定點範圍的排程；並且在額定功率 22kW 的 AC 充電站(Schneider Electric EVlink Parkplatz 3)與額定功率 50kW 的 DC 快速充電站(Alpitronic Hypercharger HYC150)分別進行測試，測試的 EV 則為電池容量 77kWh 的 Volkswagen ID.4 Pro，此 EV 可接受的最大充電功率分別為 11kW 的 AC 或 135Kw 的 DC，如圖 30 與圖 31 所示：

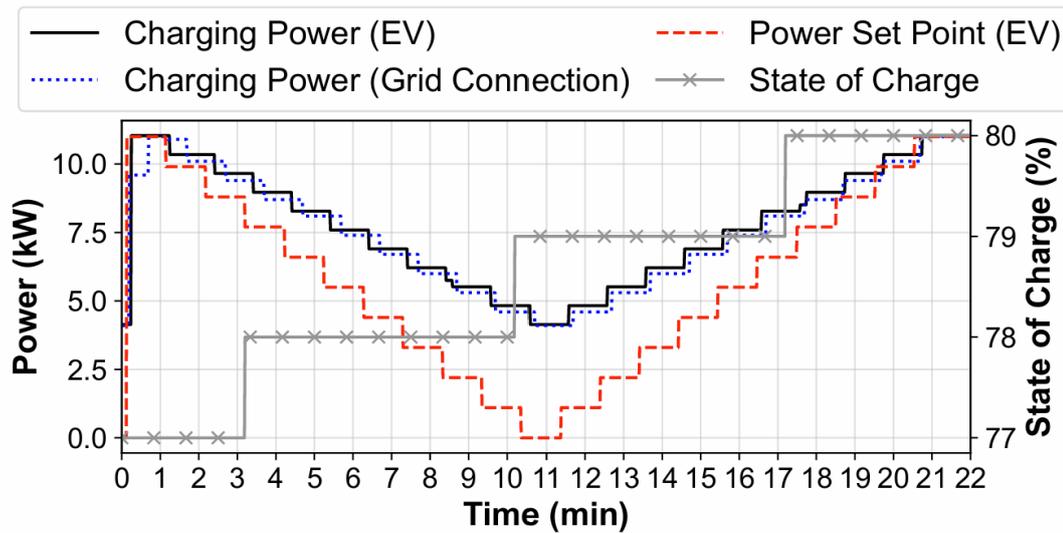


圖 30 AC 充電站(Schneider Electric EVlink Parkplatz 3) [11]

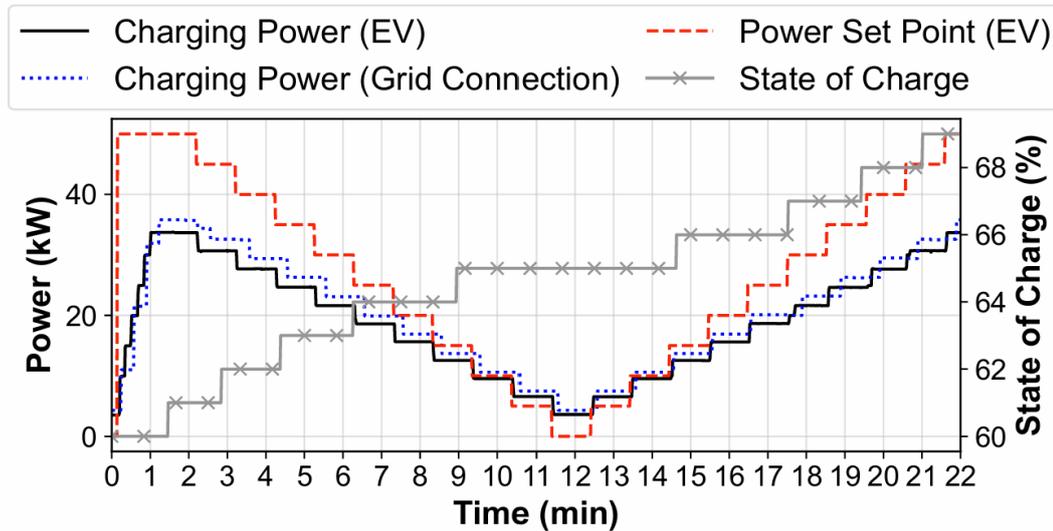


圖 31 DC 充電站(Alpitronic Hypercharger HYC150) [11]

圖 30 與圖 31 中，紅色虛線為 SCSP 設定充電樁應對 EV 充電之功率值，而 EV 實際衝入的功率值為黑色實線，藍色虛線則是電網注入到充電樁

之功率，帶 x 標記的灰色線則 SoC(解析度為 1%)。可以發現，黑色實線與藍色虛線相當貼近，代表流入充電樁與流出充電樁的功率相當匹配。紅色虛線則與前述兩者並不總是貼近，在 AC 充電站是設定點越低偏差就越多，僅在設定滿功率時貼近；在 DC 充電站則是設定點越高就偏差越多，僅在設定 20kW 以下時貼近，但在設定 0kW 時也略有偏差。

關於低功率(低於 5kW)區間的偏差，可以「最低充電功率」機制解釋：EV 與充電裝之間若要維持充電會話(Charging Session)所必須消耗的最低功率，AC 充電站最低充電功率為 4.14kW，DC 充電站則為 3.55kW。根據 ISO 15118 標準，充電會話只允許從 EV 側中斷，這阻礙了來自 CPO 側的控制，造成低功率區間的充電指令執行偏差。高功率區間的偏差則只發生在 DC 充電站，這是由於 VPPO 在生成最佳化功率設定點排程後，卻又因為電網側供需平衡的需求，而未完整提供 SCSP 充電指令需求之功率。

以 Power Set Point 作為橫軸，Charging Power 作為縱軸可得到分布圖，可藉此得到其 Fitted Function，如圖 32：

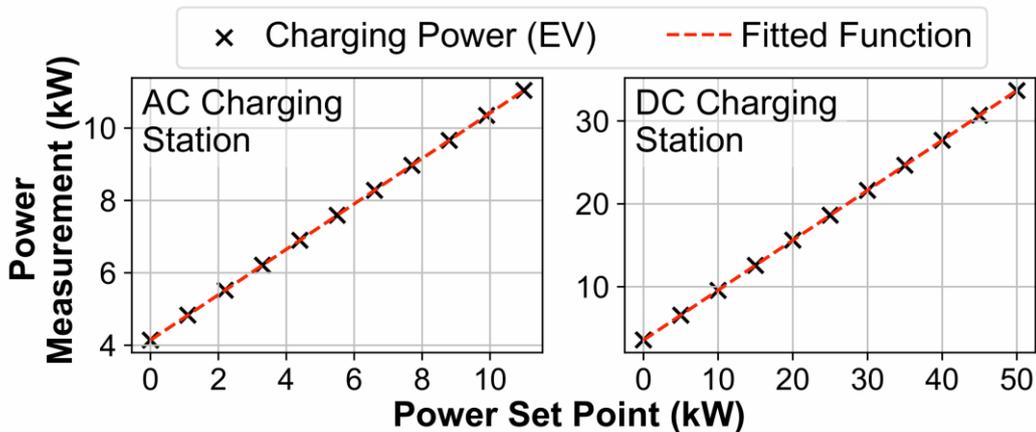


圖 32 EV 功率設定點與充電量測值作圖與其 Fitted Function [11]

AC 與 DC 的 Fitted Function：

$$P_{meas}^{AC,fit} = 0.63 \cdot P_{set}^{AC} + 4.14kW$$

$$P_{meas}^{DC,fit} = 0.60 \cdot P_{set}^{DC} + 3.55kW$$

Fitted Function 與分布點高度重合證明：在 VPPO 與最低充電功率決定上下限區間後，實際充電功率便在此區間內依功率設定點等比例(線性)變化。

四、PMU 相關之論文

(一)WAMS 應用於系統震盪監測

「Wide-area Measurement Based Online Oscillation Alarming System at RTE」[12]與「Computational Analysis of Online Oscillation Monitoring Algorithms」[13]是兩篇由華盛頓州立大學的研究團隊發表，皆由 Vaithianathan “Mani” Venkatasubramanian 進行口頭報告。

兩篇文章介紹兩套基於 PMU (Phasor Measurement Unit)的廣域測量系統 (Wide-Area Measurement System, WAMS)。WAMS 進行連續動態即時監測和分析，在不良震盪(小訊號不穩定)發生時警示(Alert)或警告(Warn)調度員。RTE (Réseau de Transport d'Électricité，法國的 TSO)開發的 WAMS 系統如圖 33 所示，含多個 PMU、開源相量資料集中器(Phasor Data Concentrator, PDC)、OperatorFabric 視覺化系統、作者團隊開發的 MANTRA(Modal ANalysis and oscillation TRacking)系統、Grafana 開發的人機介面，以及資料庫。

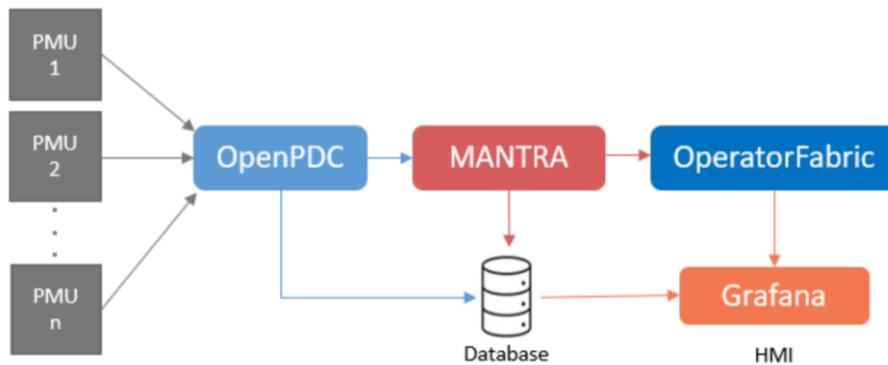


圖 33 RTE 開發的 WAMS 架構 [12]

第二篇論文的 WAMS 系統如圖 34 所示，由多個 PMU(此論文使用 152 個)、PDC、商用平台(SEL Synchrowave Platform)、OMS (Oscillation Monitoring System)、圖形顯示介面、警示/警告燈號，以及資料庫組成。

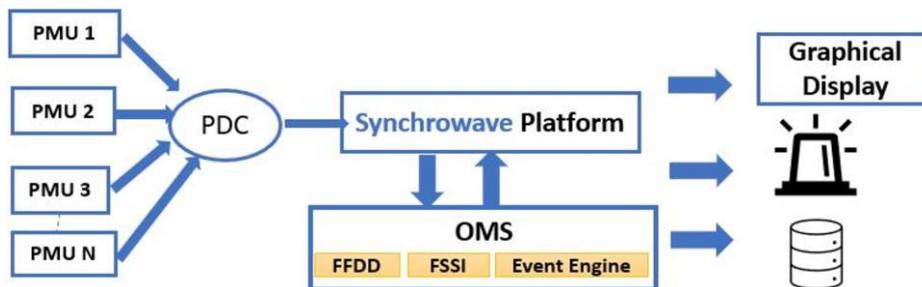


圖 34 研究團隊開發的 WAMS 架構 [13]

MANTRA 與 OMS 類似，內建多個相量分析演算法以判斷是否觸發警示燈號。兩者皆內含 2 個計算引擎：事件分析引擎(Event Analysis Engine)與環境分析引擎(Ambient Analysis Engine)。前者用於 Ring-down 分析，後者用於 Ambient 分析，以圖 35 為例：

- **Ring-down Analysis**：系統暫態中，因線路跳脫、發電機跳脫等短暫供需不匹配造成的(相對 Ambient)大幅度阻尼震盪。
- **Ambient Analysis**：系統在正常狀態下，因小型的負載變化而產生噪聲般的隨機波動。

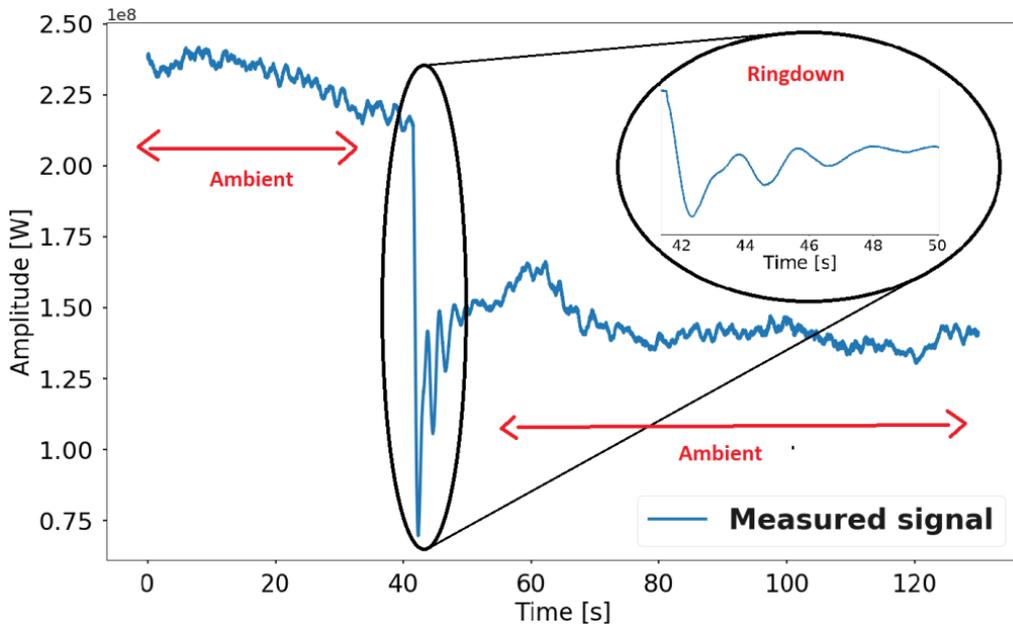


圖 35 Ambient and ringdown data from the Nordic grid [14]

事件分析引擎使用的演算法包含：Prony、Matrix Pencil、Hankel Total Least Square (HTLS)、Eigenvalue Realization Algorithm (ERA)。這些演算法都涉及大型矩陣運算，矩陣階數(order)會對計算結果帶來影響，階數不足會失準，階數過多不但會增加計算負擔，也會增加不必要的雜訊，因此選定適當的系統階數可以在不犧牲準度的前提下減少計算負擔。事件分析引擎使用移動窗格法，寬度差不多 10 秒的 PMU 訊號，並每秒移動一次窗格。

環境分析引擎使用的演算法則是：Fast Frequency Domain Decomposition (FFDD)與 Fast Stochastic Subspace Identification(FFSI)。環境分析引擎也是使用移動窗格法，FFDD 使用寬度 70 秒的 PMU 訊號，每 10 秒移動一次窗格，FFSI 則是使用寬度 120 秒的 PMU 訊號，並每 20 秒移動一次窗格。

警示/警告判斷：

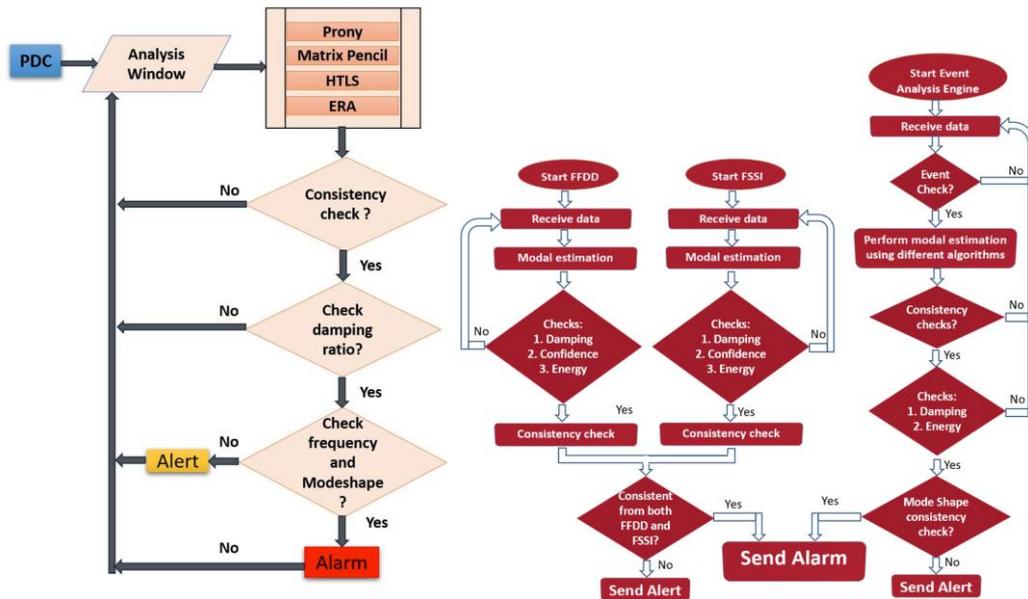


圖 36 警示/警告判斷：左為 Ring-down 分析[13]，右為 Ambient 分析[12]。

CPU 負荷：由於兩個分析引擎每移動一次窗格就要完成計算一次，代表事件分析引擎每秒就要完成一次，而環境分析引擎每一筆計算所使用的數據量都相當龐大(移動窗格越寬，計算數據就越多)，尤其當兩個計算引擎同時運作時，對系統 CPU(Synchrowave Platform 使用 Intel® Xeon® CPU E2643 v2 3.50GHz, 2processors)會造成巨大負擔。

論文中減輕 CPU 負擔的方式是減少樣本數，事件分析引擎的作法是直接降低階數；環境分析引擎的作法是將一定比率的測試資料(隨機分布)替換成 NaN 值，這會使系統在訊號預處理(pre-processing)階段透過線性插值進行處理。在不做這些調整的情況下，系統會持續使用 100%的 CPU 效能導致凍結，調整後，CPU 使用率 100%的持續時間會縮短，在系統凍結前完成計算。

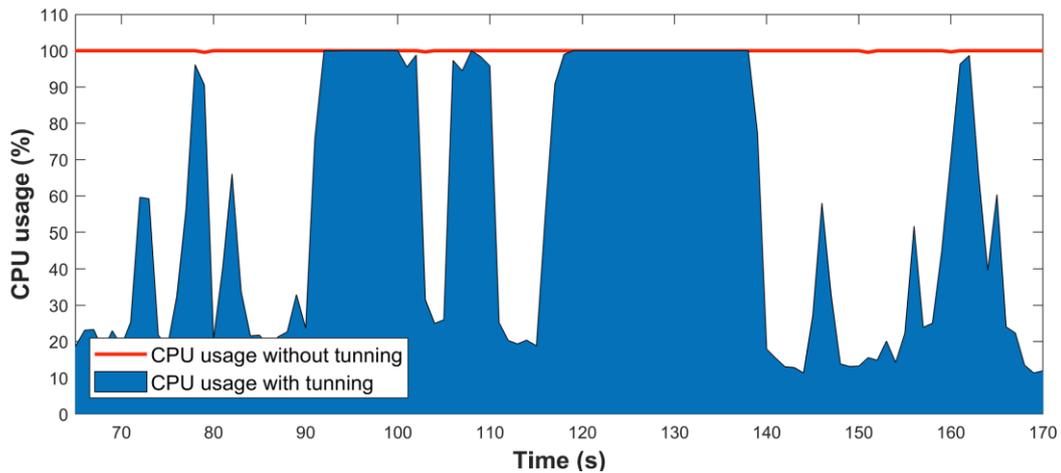


圖 37 CPU 使用率：紅線為調整前，藍色區域為調整後[13]

經實驗在環境分析引擎替換不同比例的 NaN 值後發現：

- **FFDD 演算法**的頻率和阻尼比估計結果在 NaN 值替換率從 0%到 95%仍保持一致。然而，當 NaN 含量高於資料集的 20%時，估計的可信度(confidence)及其可觀察性(observability)會下降。
- **FSSI 演算法**的頻率估計對於含量 0%到 50%的 NaN 值也是一致的，但阻尼比估計值隨著 NaN 含量的增加而降低。作為一種時域方法，FSSI 與 FFDD 不同，估計的可信度是無法計算的。FSSI 的可觀察性則也不像 FFDD 隨 NaN 占比提高而一致下降，而是受線性插值機制影響，隨 NaN 占比提高上下起伏。

應用：RTE 的 WAMS 在 2023 年 6 月起在 RTE 巴黎控制中心上線，主要用來監測西班牙出口送往法國的電力潮流是否觸發傳輸限制(Constraint)。

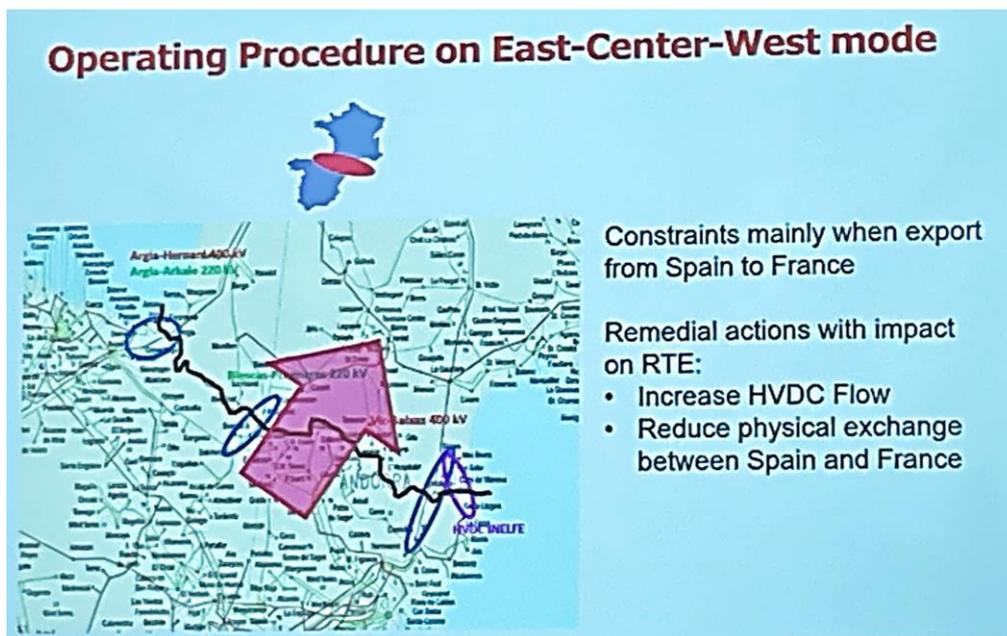


圖 38 跨越西班牙與法國的電力潮流輸送 (資料來源：講者簡報)

(二) 一種 μ -PMU 設計

「Experimental End-To-End Delay Analysis of LTE Cat-M With High-Rate Synchrophasor Communications」[15]論文由紐約州立大學水牛城校區(the State University of New York at Buffalo)的 Filippo Malandra 助理教授及兩位研究生共同發表。此次由 Malandra 助理教授口頭報告。

不同於傳統 PMU (phasor measurement unit, 相量量測單元), μ -PMU (micro-PMU)是適用於配電網層級的相量量測單元, 可應用於狀態估測、保護以及控制, 尤其過去十年中, 分散式能源大量增加, 使得量測用的 μ -PMU 也隨之增加。PMU 將同步相量回傳控制中心的方法有許多種, 但近年來採用無線通訊(如 LTE)的方式越來越流行, 此論文實踐 μ -PMU 的方式 LTE Cat-M 便是一種低功耗的無線傳輸。本文提出的 μ -PMU 硬體架構, 雖參考 IEEE C37.118 等傳統 PMU 標準, 但並不嚴格符合傳統 PMU 之定義, 然而如表 6 所示, 並非所有規格都較傳統 PMU 寬鬆。

	可容忍延遲上限	總向量誤差 (TVE)	相角精度	振幅解析度	角度解析度	幀數
傳統 PMU	1 秒	$\pm 0.01\%$	± 0.003	$\pm 2 \times 10^{-3}\%$	$\pm 10^{-3}$	120/秒
μ -PMU	1 秒	$\pm 0.05\%$	± 0.001	$\pm 2 \times 10^{-3}\%$	$\pm 2 \times 10^{-3}$	100~120/秒

表 6 傳統 PMU 與 μ -PMU 的規格差異 [15]

傳統 PMU 基於高效能低延遲的需求, 採有線傳輸, 例如乙太網路或電力線通信; μ -PMU 則是考量到安裝難度與可擴充性, 較適合使用無線網路, 例如蜂巢網路(Cellular)的 WiMax、UMTS 與 LTE...等, 相對有線傳輸的可靠性, 無線傳輸需要承受掉幀或意外干擾導致的性能下降等導致延遲增加的缺點。在眾多無線技術中, 此論文選擇的 LTE cat-M 是蜂巢物聯網(C-IoT)的技術之一, 基於 LTE 的特點是占用相對少的頻帶, 且成本相對其他蜂巢網路技術更低。

PMU Name	GridTrak PMU [27]	OpenPMU V1 [28]	OpenPMU V2 [28]	Mohapatra [29]	Our Design
Approx. cost	150\$	400\$	100\$	500\$	150\$
Hardware	dsPIC30F microcontroller	NI DAQ	BeagleBone B.	Arduino Due	Arduino Mega
Software	C#	LabView	Linux	Linux, Python	Python
Open-Source	Yes	No	Yes	Yes	Yes
IEEE C37.118.2 Compliance	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Communication	Wired	Wired	Wired	Wired	Wireless (LTE cat-M)

表 7 各 μ -PMU 實踐方案 [15]

表 7 比較此研究與其他四個 μ -PMU 實踐方案：

1. GridTrak PMU 使用兩個微控制器，一個生成相量，另一個生成 1 PPS(1 pulse per second)時間同步訊號。此方案成本效益上相對優秀，但使用客製化 PCB 使得在無法取得 PCB 的地方難以實踐。
2. OpenPMU 專案目標是創造低成本開源 PMU 解決方案。V1 使用國家儀器硬體和 LabView 軟體，兩者綁定，對部署是很大的障礙。
3. 承上，這在 V2 中透過使用開源硬體和軟體都得到改善，而且成本在所有方案位列最低，但具體實踐細節和韌體皆無法得知(not available)，這增加了部署的複雜性。
4. Mohapatra 使用三個微控制器進行相量測量和報告。該方案還需要一台有線外部電腦進行資料處理和視覺化，這降低了廣泛部署的可行性。
5. 此論文的方案如圖 39 所示，由兩個主要模組組成：同步相量產生模組(Synchrophasor Generator)和通訊模組(Communication)。由此二模組組成的 μ -PMU 將交流訊號的相量透過無線通訊上傳到雲端伺服器，也就是相量資料集中器節點(Phasor Data Concentrator node, PDC node)。

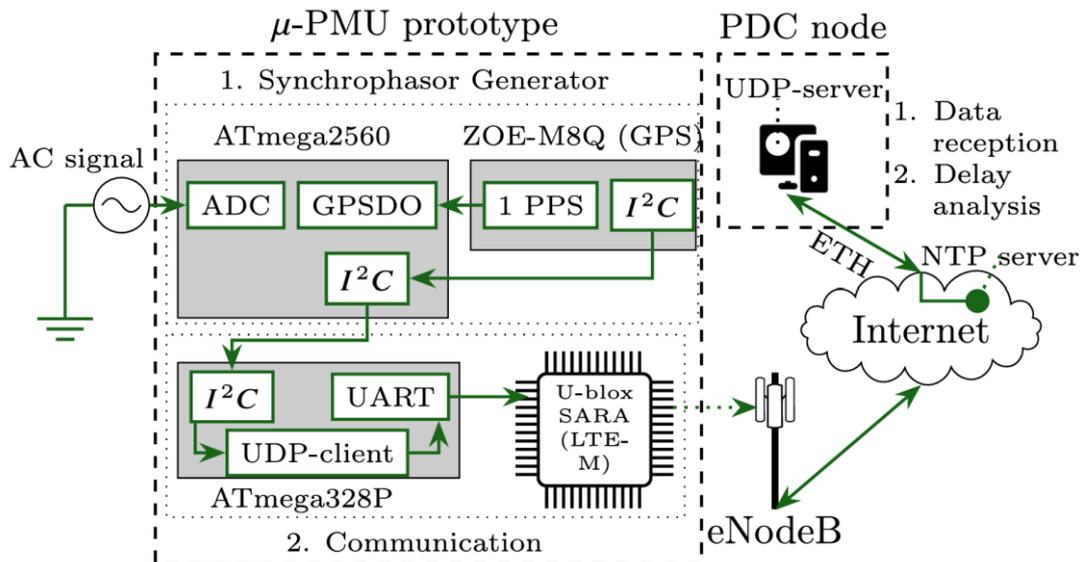


圖 39 此論文 μ -PMU 實踐方案 [15]

圖 39 中，相量產生模組使 Arduino ATmega2560 可以監測交流訊號源在時間點 t_i 的相量 $\xi(t_i)$ ， $\xi(t_i)$ 為內則包含一組數值：電壓振幅 $v(t_i)$ 、相位角 $\varphi(t_i)$ 、頻率 $f(t_i)$ 、和頻率變化率 $\rho(t_i)$ 。ATmega2560 基本版內建一個 10bit 的類比-數位(Analog to Digital, ADC)轉換器，將交流訊號的取樣類比值轉為數位訊號。ATmega2560 內另有一個 GPS 數位震盪器(GPS Digital Oscillator, GPSDO)產生與 ZOE-M8Q GPS 模組送來的 1PPS 訊號同步的等距脈衝，用於生成 1600Hz 的 PWM 訊號供 ADC 取樣，使 50Hz 的 AC 訊號每週波得以取樣 32 點，也可以產生 1920Hz 的 PWM 訊號匹配 60Hz 的 AC 訊號。ATmega2560 以 1PPS 校時(每秒鐘校正一次)其內部計時器，內部計時器的時戳則是以 $1\mu s$ 為最小單位。

相量 $\xi(t_i)$ 計算發生於 ATmega2560 之中，時序上對應於圖 40 中的第 1 段(耗時 δ_1)。然後訊號透過 I²C 介面傳輸至通訊模組的 ATmega328P(耗時 δ_2)，ATmega328P 作為 UDP-client 負責向 作為 UDP-server 的 PDC 節點進行無線通訊傳輸同步相量幀(耗時 $\delta_3+\delta_4+\delta_5+\delta_6$)。其中第 3 段對應的工序是將第 1 段產生的 $\xi(t_i)$ 依 IEEE C37.118.2 標準[16]定義之資料格式合併到一個幀(訊框)，如圖 41。

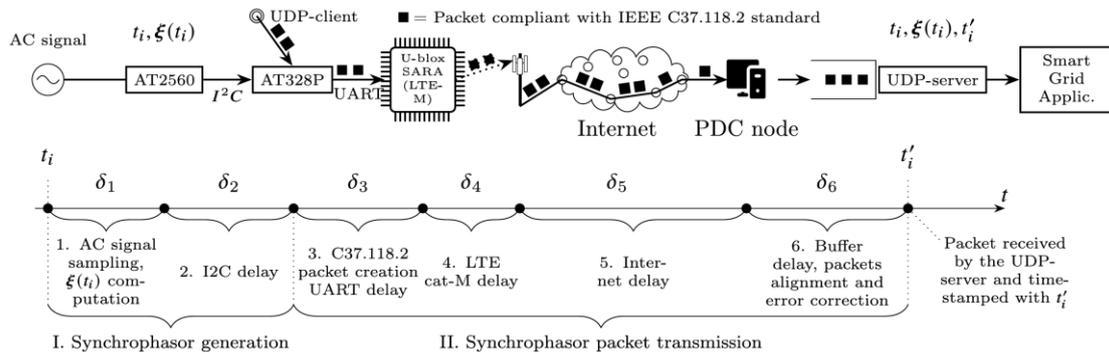


圖 40 建立同步相量幀到傳輸至 PDC 之工作流程 [15]

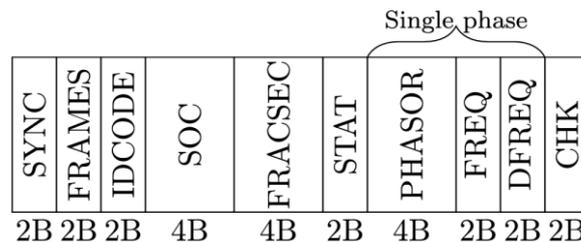


圖 41 IEEE C37.118.2 標準同步相量幀之資料格式 [15]

IEEE C37.118.2 同步相量資料格式中，SOC (Second Of Century，世紀秒) 和 FRACSEC (FRACtion of SECond，等分秒)用於表示時戳 t_i ；PHASOR 包含 $\xi(t_i)$ 中的振幅度和相位；FREQ 代表 $f(t_i)$ ；DFREQ 代表 ROCOF 指標 $\rho(t_i)$ 。最後 CHK 是根據 CRC (cyclic redundancy check) 用於突發錯誤檢測的校驗和(checksum)。

ATmega328P 作為 UDP-client 與 PDC 作為 UDP-server 都是藉由 Python 實踐(表 7)。UDP-client 建立同步相量幀，並通過 UART 介面傳輸至 U-blox SARA 模組，使其在實體層得以藉由 LTE cat-M 傳輸。U-blox SARA 模組將同步相量幀傳輸到 LTE cat-M eNodeB，以後者的天線將資料傳遞至網際網路，並在最終抵達 PDC 節點。抵達 PDC 節點後，這些同步相量幀才會被重新對齊，對齊後 PDC 節點(UDP-server)會依自身計時器添加時戳 t_i' (見圖 40)，此時戳用於計算端對端(end-to-end)延遲 $\mathcal{D}(t_i)$ 。 $\mathcal{D}(t_i)$ 定義為從 $\xi(t_i)$ 從 AC 訊號源產生(t_i)到 $\xi(t_i)$ 被 PDC 節點接收(t_i')，因此 $\mathcal{D}(t_i) = t_i' - t_i$ ，而此計算的前提是產生時戳 t_i 的 ATmega2560 與產生時戳 t_i' 的 PDC node 主機必須時間同步，此論文在此使用網路時間協定(Network Time Protocol, NTP)進行同步，為求同步品質，ATmega2560、ZOE-M8Q GPS 以及 PDC node 主機皆對同一顆 GPS 衛星進行同步。

LTE Cat-M 技術概述：鑒於整合到配電系統中的分散式能源急劇增加，廉價且易於安裝的 C-IoT 網路是支援這種高速和小規模通信的優秀方案，其他主要替代方案可以是 LTE cat-M、LTE CAT-1、NB-IoT 和 LoRa 等等。此論文採用的 LTE cat-M 是一種低功耗廣域(Low Power Wide Area, LPWA)介面，適合在具有中等 Data Rate 要求的 IoT 和 M2M 連接，此外，LTE-M 支援子載波(sub-carrier)之間的「跳頻」，使 LTE-M 更能抵抗訊號衰減與干擾，以及網路壅塞問題。

	CAT-NB1	CAT-M1	CAT-1	LoRa
Peak Data Rate	27.2/33.25 kb/s (DL/UL)	375 kb/s (DL/UL)	10/5 Mb/s (DL/UL)	0.3-50 (DL/UL)
Radio Spectrum	180 KHz	1.4 MHz	20 MHz	125 KHz
Latency	1.5-10 s	100-150 ms	50-100 ms	High (Device Dependent)
Max. Coupling Loss	164 dB	155.7 dB	-	157 dB
Tx Power	46dBm/23dBm (DL/UL)	43dBm/23dBm (DL/UL)	23dBm (DL/UL)	27dBm (DL/UL)
Number of antennas	1	1	2	1
VoLTE support	No	Yes	Yes	No
Power Consumption	LOW	LOW	HIGH	LOW

表 8 無線通訊可行方案比較表 [15]

前述 4 種無線通訊可行方案比較如表 8 所示。此論文不考慮 LTE CAT-1 的原因是它的高功耗，以及不必要的高 Data Rate。另一方面，LoRa 雖然相對低功耗，但高延遲與 Data Rate 過低使其成不被採用。最後，選擇 LTE cat-M 而非 NB-IoT 是因為 LTE cat-M 具有更低的延遲、更高的 Data Rate 和更好的覆蓋範圍，故此論文選擇 LTE cat-M。

實驗結果：實驗採用 50Hz 交流訊號，同步相量 $\xi(t_i)$ 以每秒 50 幀(每週波一筆)。量測值如圖 42，橫軸刻度為秒。由圖 42(c) 可見到，量測頻率值在 $f = 50 \text{ Hz}$ 的標稱值附近波動，此波動的起因可能是因為 AC 訊號產生器或 ATmega2560 內的 ADC 轉換器的電路缺陷造成訊號偏差，訊號偏差會導致不正確的離散傅立葉轉換(Discrete Fourier Transform, DFT)計算，連帶使得：

1. 振幅 $v(t_i)$ 以正弦波的形式波動，如圖 42(a) 所示。
2. 相位角 $\phi(t_i)$ 呈鋸齒狀，如圖 42(b) 所示，這是因為當 $f(t_i) > f_0 = 50\text{Hz}$ ，相位角會隨時間增加，而 92% 的觀測值 $f(t_i)$ 大於 f_0 ，因此 $\phi(t_i)$ 從 $-\pi$ 經過約 30 秒一路上升到 π 。可注意到在相同的時間跨度內，隨相位角 $\phi(t_i)$ 走過一個週期，振幅 $v(t_i)$ 也完成一個正弦週波的震盪。
3. 頻率變化率 $\rho(t_i)$ ，定義為 $\rho(t_i) = \Delta f / \Delta t = (f(t_i) - f_0) / T = (f(t_i) - f_0) \times f_0$ ，與 $f(t_i)$ 有相似的趨勢，如圖 42(d)。

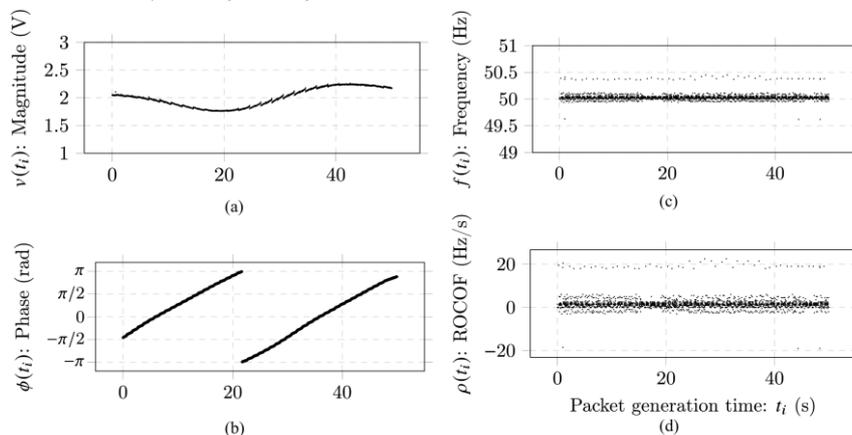


圖 42 實驗結果數據 [15]

網路效能：此文對網路關鍵效能指標(Key Performance Indicators, KPI)進行詳細分析，包含端對端延遲 $\mathcal{D}(t_i)$ 、點對點延遲 $\delta_1 \sim \delta_6$ ，以及抖動(jitter)。以實驗結果來看， δ_1 與 δ_3 皆維持在 1ms 以下， δ_2 平均是 1~2ms， δ_6 在幾乎全部結果都是 0，而 δ_5 網際網路延遲因為是發生在公共網路，故本文並無權限調控相關變因。綜上所述，此論文後續討論將聚焦在 δ_4 ，LTE cat-M 延遲。

如圖 40 所示，使用 UDP socket (位於 AT2560 中)回報同步相量 $\xi(t_i)$ ；UDP-client (位於 AT328P 中)以固定頻率 λ (每秒 λ 幀)傳輸同步相量 $\xi(t_i)$ ；UDP-server 透過 DSL (Digital Subscriber Line)路由器和乙太網路連接到網際網路。PDC 節點(UDP-server)負責接收包含同步相量資料的訊框、重新調整它們並補償通訊中的錯誤：然後這些資料可用於監控與分析。此外，PDC 節點必須計算並儲存端對端延遲 $\mathcal{D}(t_i)$ ，用於後續資料處理和分析。連續幀之間的傳輸時間(以下記為 Δt)可以簡單計算為 $\Delta t = t_i - t_{i-1} = 1/\lambda$ 。

LTE cat-M 延遲(δ_4)：表 9 中，以傳遞頻率(報告率) λ 與端對端延遲 \mathcal{D}_i 進行交叉分析。雖然 λ 常見值是 50 或 60 幀/秒，此論文決定用廣泛的 λ 值來測試通訊系統，以便更深入了解 LTE cat-M 對於智慧電網的多元應用。在表 9 中，記錄了 \mathcal{D}_i 包括最小值、最大值、標準差、第一和第三四分位數(即 Q1 和 Q3)、抖動、延遲真實平均值的 95% 信賴區間以及幀丟失(frame loss)。依表 9 呈現之結果可以得知，除了抖動以外， λ 高低對 \mathcal{D}_i 影響不大。

Report. rate λ (frames/s)	Delay \mathcal{D}_i (ms)							
	min	max	st.d.	Q1	Q3	jitter	95%-CI	Fr. Loss
1	145.37	201.17	20.19	147.22	187.29	40.02	168.11 \pm 2.29	0%
10	136.14	231.89	22.47	156.29	196.16	30.03	168.78 \pm 0.57	0%
50	138.47	514.56	18.34	159.93	184.75	19.61	172.69 \pm 0.29	0%
60	136.69	246.34	17.96	157.33	188.12	18.36	173.50 \pm 0.26	0%
80	132.97	226.44	17.05	148.86	177.91	14.14	162.95 \pm 0.22	0%

表 9 傳遞頻率 λ 與端對端延遲 \mathcal{D}_i 交叉分析 [15]

PMU num.	Delay \mathcal{D}_i (ms)							
	min	max	st.d.	Q1	Q3	jitter	95%-CI	Fr. Loss
1	123.84	550	56.10	148.28	183.99	20.23	175.77 \pm 0.63	0%
2	138.65	330	41.92	166.19	199.35	25.54	183.9 \pm 0.47	0%
3	136.46	651	49.65	162.04	195.07	22.5	182.84 \pm 0.56	0%

表 10 μ -PMU 數量與端對端延遲 \mathcal{D}_i 交叉分析 ($\lambda=50$ 幀/s) [15]

Frame Size (bytes)	Delay (ms)							Loss
	min	max	st.d.	Q1	Q3	jitter	95%-CI	
26 (1-Phase)	138.47	514.56	18.34	159.93	184.75	19.61	172.69 \pm 0.29	0%
42 (3-Phase)	160.64	293.08	14.61	182.20	204.73	16.83	193.99 \pm 0.23	0.2%
52 (2x)	164.11	259	17.29	158.9	183	31.67	170.88 \pm 0.27	0.6%
78 (3x)	168.14	367.62	20.37	195.96	226.41	30.14	211.38 \pm 0.32	3.3%

表 11 訊框(幀)大小與端對端延遲 \mathcal{D}_i 交叉分析 [15]

表 10 將變因 λ 替換成 μ -PMU 數量，同樣對 \mathcal{D}_i 並無顯著影響；表 11 將變因 λ 替換成訊框(幀)大小，可以觀察到對於 min、Q1 有一致因訊框變大導致延遲變久，此現象是因為處理大訊框時 LTE 模組效能會下降，因此在其他變因都趨近最佳表現的前提下 ($\mathcal{D}_i \doteq \mathcal{D}_{i(\min)}$)，LTE 模組效能的差異便會顯現。此外，Frame Loss 隨 Frame Size 變大而提高，這也是因為 LTE 模組中延遲增加會導致封包更容易從緩衝區遺失。

參、心得與建議

本次參加 IEEE SmartGridComm 2024 智慧電網通訊國際會議，獲益良多，此行首要關切之主題「分散式能源資通訊」來說，「Realizing Smart Charging of Electric Vehicles at Public Charging Infrastructures Using Standards-Based Communication Architecture」[11]這篇論文完全契合目標。該論文首先完整介紹德國 EV 在智慧充電的商業模式與通訊協定 (ISO 15118)如何互相影響，並以實驗解釋為何 ISO 15118 會造成充電指令執行不確實。然後該論文提出改善方向，包括：

1. 以法規要求 OEMs 公開 EV 的 SoC(此法規已通過但尚未生效)
2. 建議 OICP 2.x 新增「合約 ID」、「SoC」、「充電配置(充電功率設定點的時間序列)」、「用戶偏好(用戶所需 SoC 及領車時間)」的 4 個點位以支援智慧充電
3. 必要時 ISO 15118 應將切斷 Charging Session 權限授予充電站

此外，Steven Low 教授的 keynote speech 以及「Strategic V2G Trading in Local Energy Market Considering Minimum Energy Requirement」[7]雖未提出創新的資通訊技術細節，但也提供了美國加州與中國深圳 EV 在充電技術與商業模式的發展趨勢，特別是中國深圳已在發展 V2G 的基礎建設這點值得會議後持續關注。「Vehicle-to-Vehicle Charging Model, Complexity, and Heuristics」[9]則是討論過去較少被關注的車對車充電，現已有幾款車型支援此功能，或許未來有機會被納入大規模 EV 充電的商業模式的一環。

「Experimental End-To-End Delay Analysis of LTE Cat-M With High-Rate Synchronphasor Communications」[15]討論 μ -PMU 的一種設計方案以及其效能評估指標(時間延遲)。考量到 μ -PMU 是應用在配電系統的相量量測單元，此論文的研究概念及方法對於配電級分散式能源的時間延遲量測(筆者自提研究題目)具有相當高的相似性。論文中將端對端時間延遲分割為 δ_1 到 δ_6 頗具啟發意義，對於各段延遲控制多個變量進行互相對照的研究方法很值得學習，例如文中對 δ_4 (LTE cat-M 延遲)的控制變量包含 report rate、 μ -PMU 數量以及訊框長度。

G3-Alliance 帶來的 keynote speech [4]中，雖然使用了對法國以外的其他國家都很少見的電力線通訊應用，但講者講述未來智慧電表的轉型趨勢頗具啟發性，尤其在表後分散式能源之應用屬筆者所屬部門研究主軸之範疇，應密切關注。

以筆者所屬之綜合研究所資訊與通信研究室而言，「Machine Learning-Based Feature Selection for Intrusion Detection Systems in IEC 61850-Based Digital Substations」[5]亦相當有參考價值，因為台電也正在積極建置 IEC 61850 數位變電所，符合此論文之背景條件。此論文針對資訊攻擊的情境模擬與對策都值得台電借鏡。附帶一提，此論文對於機器學習技術的使用情境也很值得參考。

從「Wide-area Measurement Based Online Oscillation Alarming System at RTE」[12]可以看出，即使是在法國，實務上的 WAMS 系統也是最近才正式啟用，台灣雖然有 PMU 資料，但目前沒有即時(real-time)的應用。如台電未來有打算開發 WAMS，Mani 教授的兩篇論文及過去的研究成果將會有重要意義。

最後，感謝公司派遣筆者出行本次會議，筆者收穫豐碩，取回之會議資料對於自身研究與所屬部門業務皆有助益。希望未來公司繼續提供筆者所屬部門出國計畫名額與預算，若還有機會代表公司出國，筆者也將繼續帶回豐富的參考資料，促進公司研究發展。

肆、参考文献

- [1] S. Low, "Decarbonize Energy Systems," [Online]. Available: <https://netlab.caltech.edu/assets/slides/Low-202304-CarbonNeutrality-NSFwkp.pdf>
- [2] Our World in Data. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>
- [3] S. Low, "OPF Hardness and ACN," [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=LeIEKj2I77Y>
- [4] C. Lavenu, K. Razazian, "Enhanced Grid Management with G3-Hybrid: Insights and Innovations," [Online]. Available: <https://g3-alliance.com/download/84/presentations/5805/g3-alliance-keynote-presentation-at-ieee-smartgridcomm-2024-in-oslo.pdf>
- [5] A. Eynawi, A. Mumrez, G. Elbez and V. Hagenmeyer, "Machine Learning-Based Feature Selection for Intrusion Detection Systems in IEC 61850-Based Digital Substations," *2024 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Oslo, Norway, 2024.
- [6] A. Eynawi, "Machine Learning based Feature Selection for Intrusion Detection Systems" [Online]. Available: [https://gitlab.com/ahmad.en/machine-learning-based-feature-selection-for-intrusion-detection-systems-in-digital-substations/-/raw/main/Thesis/Bachelor%20Thesis%20\(Versio%2010-04-2024\).pdf](https://gitlab.com/ahmad.en/machine-learning-based-feature-selection-for-intrusion-detection-systems-in-digital-substations/-/raw/main/Thesis/Bachelor%20Thesis%20(Versio%2010-04-2024).pdf)
- [7] C. Sun, X. Tang and J. Huang, "Strategic V2G Trading in Local Energy Market Considering Minimum Energy Requirement," *2024 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Oslo, Norway, 2024.
- [8] 南方电网, 中国电力企业联合会《车网互动规模化应用与发展白皮书 2023》
- [9] C. Gomes, J. P. Fernandes, G. Falcao, S. Kar and S. Tayur, "Vehicle-to-Vehicle Charging: Model, Complexity, and Heuristics," *2024 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Oslo, Norway, 2024.
- [10] Ford Newsroom, "Lend a hand – and a few miles – to your friends using vehicle-to-vehicle charging on F-150 Lightning, F-150 Hybrid," 2021. [Online]. Available: <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2021/12/21/vehicle-to-vehicle-charging.html>
- [11] J. F. Heinekamp, R. -C. Mendy, L. Smitmans and K. Strunz, "Realizing Smart Charging of Electric Vehicles at Public Charging Infrastructures Using Standards-Based Communication Architecture," *2024 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Oslo, Norway, 2024.
- [12] S. Ghimire, D. Joshi, V. M. Venkatasubramanian, G. Torresan, P. Chabas and S. Hivart, "Wide-area measurement based online oscillation alarming system at RTE," *2024 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Oslo, Norway, 2024.
- [13] D. Joshi, S. Ghimire, S. S. Shiuab and V. " . Venkatasubramanian, "Computational

Analysis of Online Oscillation Monitoring Algorithms," *2024 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Oslo, Norway, 2024.

- [14] Føyen, Sjur, and M. E. Kvammen. "A signal analysis toolbox for power system identification in smart grids." (2018).
- [15] S. Shah, S. Koley and F. Malandra, "Experimental End-To-End Delay Analysis of LTE Cat-M With High-Rate Synchrophasor Communications," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 22.
- [16] "IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems," in *IEEE Std C37.118.2-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*