LECTURE 16 | المحاضرة 16

Digital Twins for Power Systems

التوأم الرقمي لأنظمة القدرة الكهربائية

Real-time synchronization, hybrid modeling, prediction, and decision support

المزامنة اللحظية والنمذجة الهجينة والتنبؤ ودعم القرار

Prepared by | إعداد: Dr.-Ing. Aouss Gabash | د. م. أوس غباش

🎯 Learning Objectives

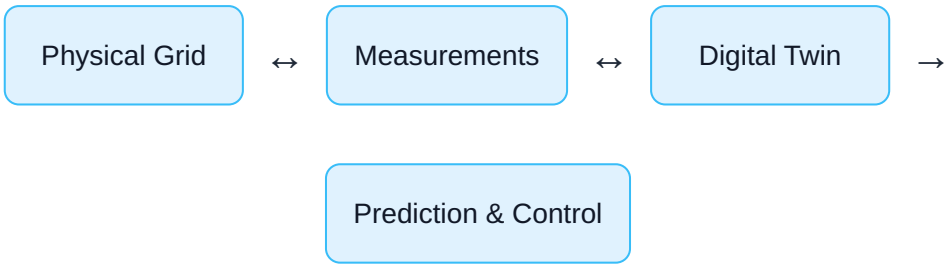
- Define a digital twin and distinguish it from simulation and monitoring.
- Explain the physical, data, model, service, and interface layers.
- Describe synchronization using SCADA, PMU, smart-meter, and IoT data.
- Combine physics-based and data-driven models.
- Apply digital twins to state estimation, predictive maintenance, and operational planning.
- Assess latency, uncertainty, validation, cybersecurity, and lifecycle challenges.

🎯 أهداف التعلم

- تعريف التوأم الرقمي والتمييز بينه وبين المحاكاة والمراقبة.
- شرح طبقات النظام الفيزيائية والبيانية والنمذجة والخدمات والواجهات.
- فهم المزامنة باستخدام SCADA وPMU والعدادات الذكية وإنترنت الأشياء.
- دمج النماذج الفيزيائية والنماذج المعتمدة على البيانات.
- تطبيق التوأم الرقمي في تقدير الحالة والصيانة التنبؤية والتخطيط التشغيلي.
- تقييم التأخير وعدم اليقين والتحقق والأمن السيبراني ودورة الحياة.

1. What Is a Digital Twin?

A digital twin is a continuously updated digital representation of a physical asset or system. It combines models, measurements, history, and services to estimate present condition, predict future behavior, and support decisions.



> A simulation may run once. A digital twin remains connected to the evolving physical system.

1. ما هو التوأم الرقمي؟

هو تمثيل رقمي حي لنظام فيزيائي، يتحدث باستمرار اعتمادًا على القياسات والتاريخ والنماذج، بهدف تقدير الحالة والتنبؤ ودعم القرار.

2. Core Architecture

Physical layer
Generators, lines, transformers, loads, converters, batteries.

Data layer
SCADA, PMU, weather, maintenance, market, and IoT streams.

Model layer
Power flow, dynamics, degradation, AI, and uncertainty models.

Service layer
Monitoring, prediction, optimization, alarms, and what-if studies.

Interface layer
Dashboards, APIs, control centers, and operator tools.

2. البنية الأساسية

يتكون التوأم من النظام الفيزيائي ومصادر البيانات والنماذج والخدمات وواجهات العرض والتكامل.

3. Data Synchronization

Measurements arrive at different rates and qualities. A digital twin must align timestamps, filter noise, detect missing values, and reconcile inconsistent sources.

$$\hat{x}_k = f(\hat{x}_{k-1}, u_k) + K_k\Big(z_k - h(\hat{x}_{k|k-1})\Big)$$

This generic correction equation expresses model prediction followed by measurement-based updating.

3. مزامنة البيانات

تصل القياسات بسرعات ودقات مختلفة، لذلك يجب توحيد الطوابع الزمنية وترشيح الضوضاء ومعالجة القيم المفقودة وتصحيح الحالة باستخدام القياسات.

4. Physics-Based, Data-Driven, and Hybrid Twins

Type	Strength	Weakness
Physics-based	Interpretability and constraint consistency	Parameter uncertainty and computational cost
Data-driven	Fast pattern learning and complex nonlinear mapping	Needs representative data and may violate physics
Hybrid	Combines physical structure with learned corrections	More complex validation and integration

$$y_{twin} = y_{physics} + \Delta y_{AI}$$

4. النماذج الفيزيائية والبيانية والهجينة

تستخدم النماذج الهجينة النموذج الفيزيائي كأساس ثم تضيف تصحيحًا متعلمًا بالذكاء الاصطناعي لتعويض الأخطاء وعدم اليقين.

5. State Estimation

$$z = h(x) + e$$

$$\hat{x} = \arg\min_{x} (z - h(x))^T R^{-1} (z - h(x))$$

The twin uses state estimation to reconstruct voltages, angles, frequency, and other hidden states from imperfect measurements.

5. تقدير الحالة

يستعيد التوأم حالات الشبكة غير المقاسة مباشرةً، مثل زوايا الجهد وبعض التدفقات، اعتمادًا على نموذج الشبكة والقياسات.

6. AI-Enhanced State Estimation

Neural networks can provide warm starts, detect bad data, estimate unobservable states, or approximate nonlinear mappings.

AI estimates should be checked against electrical constraints and residual tests before operational use.

6. تقدير الحالة المعزز بالذكاء الاصطناعي

يمكن للشبكات العصبية تسريع التقدير وكشف البيانات السيئة وتقدير الحالات غير المرصودة، مع ضرورة التحقق من القيود الفيزيائية.

7. Predictive Maintenance

A component-health twin combines loading, temperature, vibration, oil analysis, switching history, and maintenance records.

$$RUL = \mathbb{E}[T_{failure} - t \mid \mathcal{D}_{0:t}]$$

Remaining Useful Life (RUL) supports risk-based maintenance instead of fixed intervals.

7. الصيانة التنبؤية

يجمع توأم صحة المعدة بيانات التحميل والحرارة والاهتزاز والسجل التشغيلي لتقدير العمر المتبقي واختيار موعد الصيانة.

8. Scenario and What-If Analysis

- What happens if a line trips?
- Can the system support higher EV penetration?
- How will a heat wave affect transformer aging?
- Which battery schedule reduces congestion?
- What is the consequence of a sensor failure?

> The twin allows operators to test actions virtually before applying them to the real grid.

8. تحليل السيناريوهات

يمكن اختبار فصل خط أو زيادة المركبات الكهربائية أو تغير الطقس أو جدولة البطاريات افتراضيًا قبل تطبيق القرار على الشبكة الحقيقية.

9. Edge, Cloud, and Control-Center Computing

Edge
Fast local filtering, protection-adjacent analytics, low latency.

Cloud
Large-scale training, storage, fleet analytics, and long-term studies.

Control center
Operational integration with SCADA, EMS, and DMS.

9. الحوسبة الطرفية والسحابية

تنفذ المهام السريعة محليًا، بينما تستخدم السحابة للتدريب والتخزين والتحليل الواسع، ويجري التكامل التشغيلي في مركز التحكم.

10. Uncertainty Quantification

Every twin contains uncertainty from sensors, parameters, forecasts, topology, and model mismatch.

$$y \in [\hat{y} - k\sigma_y, \hat{y} + k\sigma_y]$$

Operational recommendations should include confidence bounds or risk measures rather than a single deterministic value.

10. قياس عدم اليقين

يجب أن يبين التوأم حدود الثقة أو المخاطر الناتجة عن أخطاء الحساسات والمعلمات والتنبؤات وعدم تطابق النموذج.

11. Model Calibration and Validation

1. Compare twin outputs with trusted measurements.
2. Estimate uncertain parameters.
3. Validate under normal and abnormal conditions.

4. Monitor residual drift over time.
5. Recalibrate when equipment or topology changes.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(y_k - \hat{y}_k)^2}$$

11. معايرة النموذج والتحقق منه

تُقارن مخرجات التوأم بالقياسات الموثوقة، وتُقدّر المعلمات، وتُراقب أخطاء النموذج مع الزمن لإعادة المعايرة عند الحاجة.

12. Cybersecurity and Governance

- Authenticate devices and data sources.
- Encrypt communication and protect APIs.
- Track model and data versions.
- Separate advisory analytics from protection functions.
- Log operator decisions and automated actions.
- Define ownership, update responsibility, and retirement procedures.

12. الأمن السيبراني والحوكمة

يتطلب التوأم مصادقة المصادر وتشفير الاتصال وإدارة الإصدارات وتسجيل القرارات وفصل التحليلات الاستشارية عن وظائف الحماية الحرجة.

13. Example: Transformer Thermal Twin

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta t\left[-\frac{\theta_k - \theta_a}{\tau} + \beta I_k^2\right]$$

The physical thermal model predicts winding temperature. A learned residual model can correct systematic errors caused by uncertain cooling or ambient conditions.

$$\hat{\theta}_{k+1}^{hybrid} = \hat{\theta}_{k+1}^{physics} + g_{AI}(I_k, \theta_a, \text{history})$$

13. مثال: توأم حراري للمحول

يتنبأ النموذج الفيزيائي بدرجة الحرارة اعتمادًا على التيار والجو، ثم يصحح نموذج ذكاء اصطناعي الأخطاء المنتظمة الناتجة عن عدم يقين التبريد.

14. Implementation Workflow

Define purpose → Select data → Build models → Synchronize → Validate & deploy

1. Define decisions the twin must support.
2. Identify assets, variables, and update rates.
3. Create the data architecture and quality rules.
4. Build and calibrate models.
5. Integrate services and user interfaces.
6. Validate accuracy, latency, resilience, and security.
7. Maintain the twin throughout the asset lifecycle.

14. خطوات التنفيذ

حدد الغرض والبيانات ومعدل التحديث، ثم ابنِ النماذج وعايرها واربطها بالخدمات، وبعدها تحقق من الدقة والتأخير والمرونة والأمان طوال دورة الحياة.

15. Key Takeaways

- A digital twin is a synchronized operational representation, not only a simulation.
- Useful twins combine data, physics, AI, services, and governance.
- Hybrid modeling improves speed and adaptability while retaining physical structure.
- Validation, uncertainty, cybersecurity, and lifecycle maintenance are essential.

15. الخلاصة

- التوأم الرقمي تمثيل تشغيلي متزامن وليس محاكاة فقط.
- يجمع البيانات والفيزياء والذكاء الاصطناعي والخدمات والحوكمة.
- تحافظ النماذج الهجينة على البنية الفيزيائية وتضيف المرونة.
- التحقق وعدم اليقين والأمان والصيانة المستمرة عناصر أساسية.

🧠 Review Questions

1. How does a digital twin differ from a conventional simulation?
2. What data-quality problems must be handled?
3. Why are hybrid models useful?
4. How can a twin support predictive maintenance?
5. Why must uncertainty be reported?
6. What cybersecurity controls are essential?

🧠 أسئلة المراجعة

1. ما الفرق بين التوأم الرقمي والمحاكاة التقليدية؟
2. ما مشكلات جودة البيانات الواجب معالجتها؟
3. لماذا تفيد النماذج الهجينة؟
4. كيف يدعم التوأم الصيانة التنبؤية؟
5. لماذا يجب إظهار عدم اليقين؟
6. ما ضوابط الأمن السيبراني الضرورية؟

References | المراجع

المراجع العامة المستخدمة في هذا المقرر

[1] A. Gabash, *Flexible Optimal Operations of Energy Supply Networks with Renewable Energy Generation and Battery Storage*. Saarbrücken, Germany: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, 2014.

[2] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4th Global ed. Harlow, U.K.: Pearson Education Limited, 2022.

[3] A. Gabash, “Energy Market Transition and Climate Change: A Review of TSOs-DSOs C+++ Framework from 1800 to Present,” *Energies*, vol. 16, no. 17, Art. no. 6139, 2023, doi: 10.3390/en16176139.

[4] A. Gabash, *AI Applications in Electrical Power Systems*, Version 1.0, 2026. [Online]. Available: https://aoussgabash.com

Publication Information | معلومات النشر

Document	Lecture 16 · Digital Twins for Power Systems
Course	AI Applications in Electrical Power Systems
Author	Dr.-Ing. Aouss Gabash
Version	1.0
Publication year	2026
Official website	https://aoussgabash.com
Citation style	IEEE

Recommended citation:
Gabash, A. (2026). Digital Twins for Power Systems. AI Applications in Electrical Power Systems, Lecture 16, Version 1.0. https://aoussgabash.com

المرجع المقترح:

أوس غباش، 2026، محاضرة 16، تطبيقات الذكاء الاصطناعي في أنظمة الطاقة الكهربائية، الإصدار 1.0، https://aoussgabash.com

© 2026 Dr.-Ing. Aouss Gabash. Educational use with attribution to the author and official website.