



## SMART GRID AMELIORE PAR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

### DL SGWD-AI



#### ***POURQUOI UN RESEAU INTELLIGENT AMELIORE PAR L'IA?***

Depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle, les possibilités de profiter des améliorations apportées aux technologies de la communication électronique pour résoudre les limites et les coûts du réseau électrique sont devenues apparentes. Les limitations technologiques sur le mesurage ne forcent plus à calculer en moyen les prix de pointe de l'énergie et à les transmettre à tous les consommateurs de la même manière.

Parallèlement, les préoccupations croissantes concernant les dommages environnementaux causés par les centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles ont entraîné l'envie d'utiliser de grandes quantités d'énergie renouvelable.

Les formes dominantes telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire sont très variables, de sorte que la nécessité de systèmes de contrôle plus sophistiqués est devenue évidente, afin de faciliter la connexion des sources au réseau autrement très contrôlable. La puissance des cellules photovoltaïques (et dans une moindre mesure les éoliennes) a également compromis de manière significative l'impératif pour les grandes centrales électriques centralisées. La chute rapide des coûts indique un changement majeur de la topologie de réseau centralisé à celle qui est fortement distribuée, avec la puissance étant à la fois générée et consommée jusqu'aux limites du réseau.

Enfin, l'inquiétude croissante concernant les attaques terroristes dans certains pays a entraîné des appels à



# SMART GRID



un réseau énergétique plus robuste, moins dépendant des stations électriques centrales qui ont été perçues comme des cibles d'attaque potentielles. L'intégration de modules d'Intelligence Artificielle (IA), tels que **DL AI-MODULE**, joue un rôle crucial. Des algorithmes d'IA avancés peuvent analyser de vastes quantités de données issues de ressources énergétiques distribuées, optimisant ainsi la production et la consommation d'énergie en temps réel.

En prédisant les modèles de demande et en intégrant efficacement les sources renouvelables, l'IA peut améliorer la stabilité du réseau et réduire la dépendance aux combustibles fossiles. De plus, l'IA peut faciliter la maintenance proactive et la détection des pannes, minimisant ainsi les temps d'arrêt et garantissant une infrastructure énergétique plus résiliente. Elle permettra aux consommateurs de bénéficier de solutions de gestion énergétique personnalisées, favorisant ainsi l'efficacité énergétique du système électrique.

## QU'EST-CE QU'UN RESEAU INTELLIGENT?



Le Smart Grid est un système de "distribution intelligente" de l'électricité, capable de connaître la consommation des différents utilisateurs finaux et de gérer la génération et la distribution de l'électricité selon la demande. Autrement dit, si, dans une zone donnée, nous avons une surcharge d'énergie potentielle, l'excès d'énergie peut être redistribué à d'autres zones qui en ont besoin, en fonction des demandes réelles des utilisateurs finaux.

En outre, le logiciel qui gère le Smart Grid surveille le flux électrique du système, intègre des énergies renouvelables dans le réseau et active/suspend les processus industriels ou domestiques pendant les périodes où l'électricité coûte moins/plus.

Il a donc la fonction de partager l'électricité générée par des sources diverses, tant publiques que privées, traditionnelles et renouvelables, et de garantir que les appareils électriques utilisent l'électricité aussi efficacement que possible.



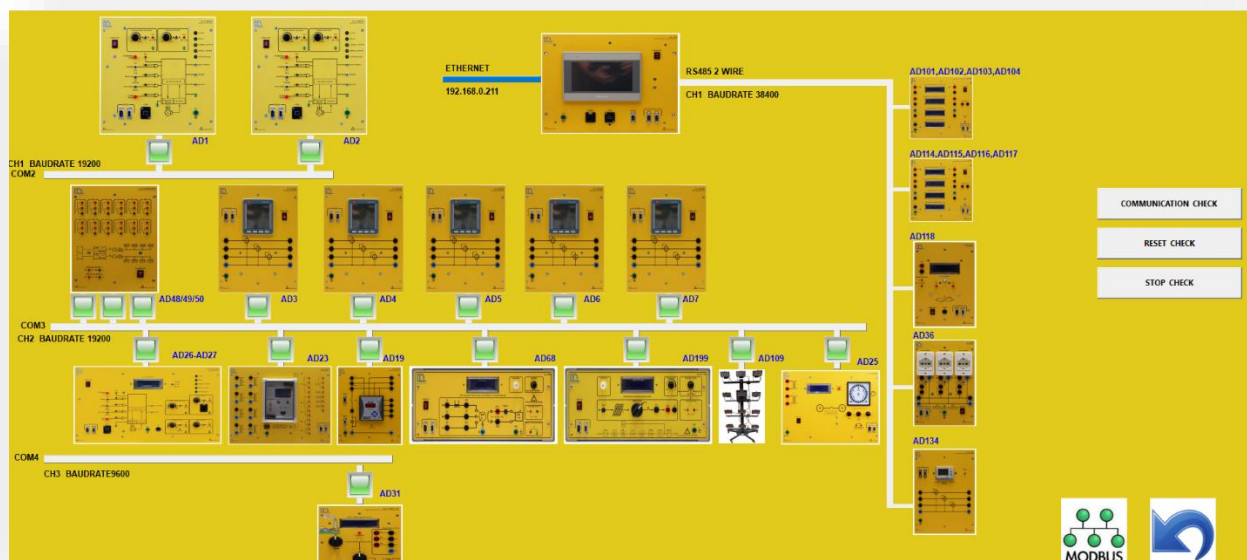
## OPEN SCADA-512

Le système complet est intégré par un logiciel de supervision et d'acquisition de données de contrôle industriel (**SCADA**) qui communique avec tous les appareils actifs du système et effectue les actions suivantes:

- Acquisition et mesures des grandeurs physiques du système;
- Contrôle du fonctionnement du système;
- Supervision visuelle du système (également à distance), à l'aide de synoptiques: état de fonctionnement, alarmes, etc.

Grâce au logiciel SCADA, l'opérateur peut surveiller le flux électrique du système afin de gérer et d'optimiser les besoins en énergie en fonction de la consommation, grâce à l'acquisition de données en temps réel provenant des appareils de mesure et des relais de protection, ainsi qu'au contrôle des actionneurs pour une gestion intelligente de l'ensemble du système électrique.

Les différentes sections du système communiquent via des bus série RS485 dédiés utilisant des protocoles de communication industriels standard tels que MODBUS RTU.



Le projet SCADA est divisé en modèles, chacun correspondant à un exercice spécifique. La licence développeur SCADA-512 ouverte fournie avec le formateur permet aux enseignants de personnaliser entièrement les modèles existants ou d'en créer de nouveaux pour superviser le système depuis un poste de travail local.

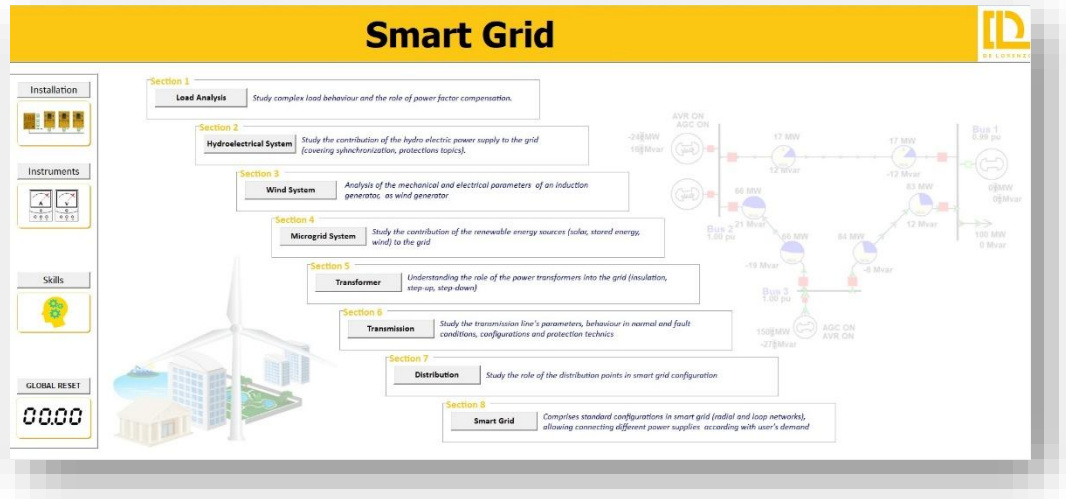


# SMART GRID

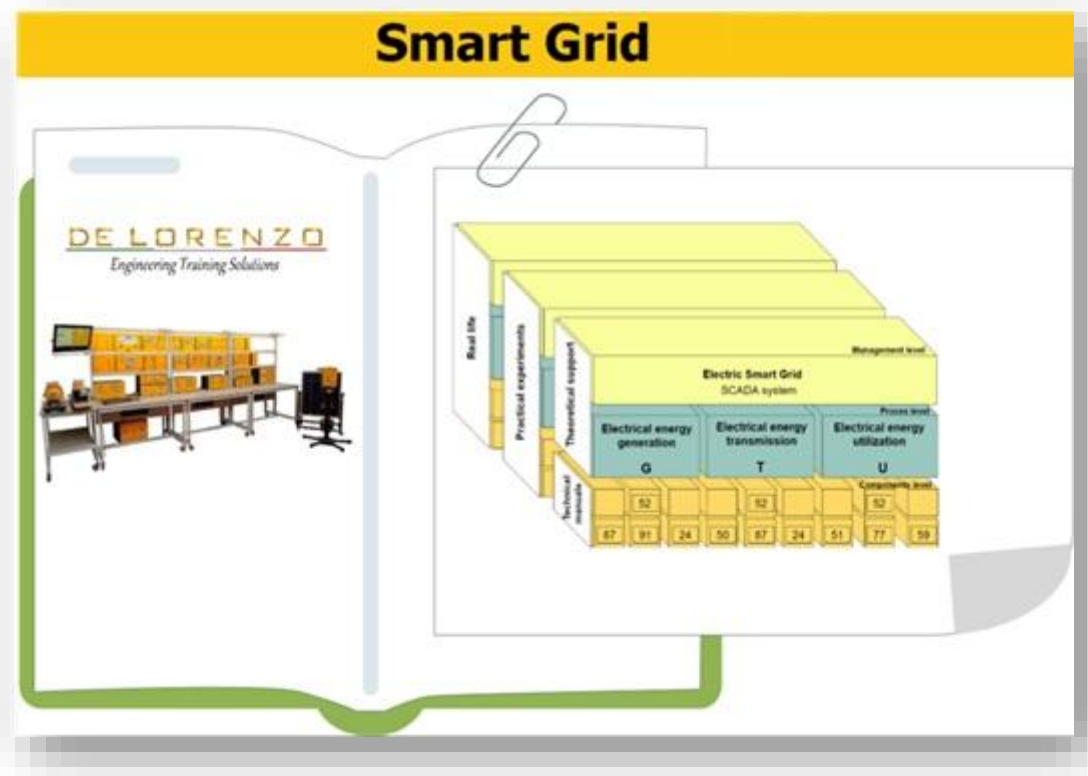


## Principales fonctionnalités du SCADA

Le logiciel est structuré selon une approche didactique, divisant chaque unité d'étude en exercices individuels.

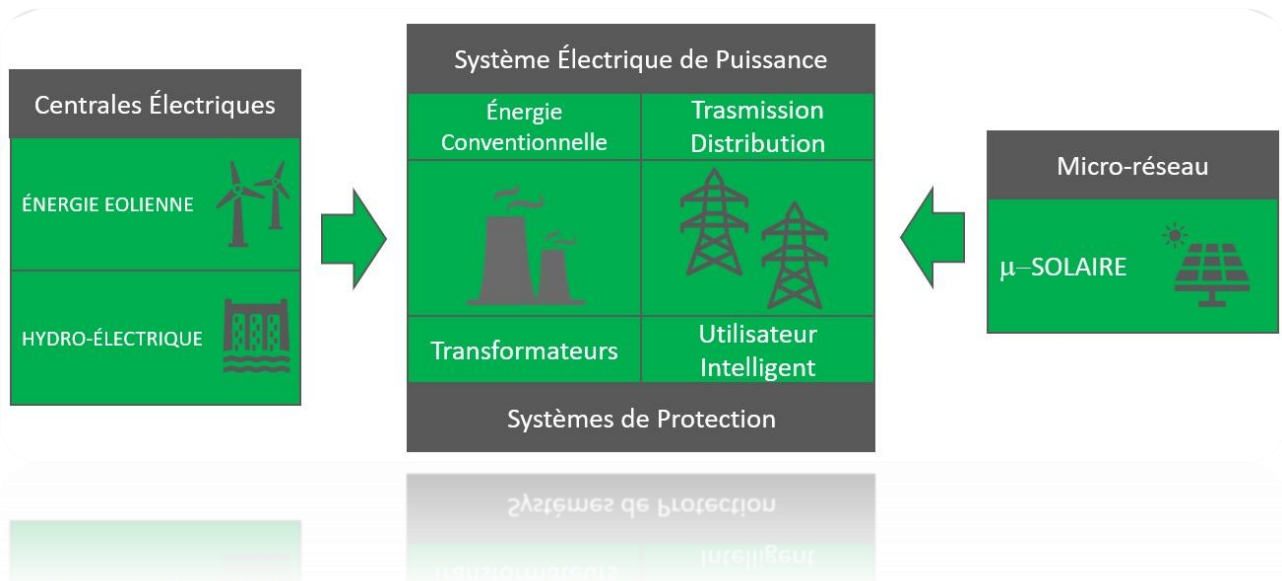


La licence ouverte SCADA-512 donne aux enseignants la possibilité de créer leurs propres projets et de personnaliser entièrement les expériences en affichant les paramètres d'intérêt et en contrôlant les actionneurs pour une gestion de l'énergie "intelligente".





## LA SOLUTION DE LORENZO



Le système de réseau intelligent développé par De Lorenzo peut être organisé en **huit sous-systèmes**, chacun composé de plusieurs modules. Les quatre premiers sous-systèmes sont des simulations de sources d'énergie; le premier est l'alimentation principale du réseau avec une unité d'alimentation triphasée qui représente une usine de charbon.

Les trois autres sous-systèmes correspondent à des sources alternatives d'énergie : éolique, hydroélectrique et solaire. La simulation de la centrale éolienne est réalisée avec un moteur à induction triphasé agissant comme générateur tandis que la simulation de la centrale hydroélectrique est réalisée avec une machine synchrone triphasée, de plus, avec un module de relais de synchronisation de générateur pour permettre la connexion au réseau. Finalement, la partie énergie solaire du système est générée avec un panneau solaire avec douze lampes à intensité réglable simulant le soleil, qui est relié à un module onduleur qui permet de transférer l'énergie générée au réseau.

Un cinquième sous-système dans le réseau intelligent est constitué de modules de protection contre les défauts. Les modules sont un relais d'alimentation qui mesure, en temps réel, des tensions et des courants pour détecter des défauts dans le réseau électrique et quatre disjoncteurs commandés par le module précédent pour déconnecter les lignes défectueuses.

Le sixième sous-système désigne les modules de mesure. Il dispose de trois compteurs de puissance appelée maximale qui mesurent les tensions alternées, les courants, les fréquences, la puissance active, la puissance réactive, la puissance apparente, le facteur de puissance et le THD pour chacune des trois phases disponibles dans le réseau et deux unités de mesure numériques à énergie électrique qui, en plus de mesurer la même chose que le module précédent, mesure les tensions continues, le courant, la puissance et l'énergie.

Le septième sous-système concerne le contrôle du facteur de puissance avec 2 modules, le premier est une batterie de condensateur commutable avec quatre valeurs différentes de condensateurs et le second est un



## SMART GRID



contrôleur de puissance réactive qui active les condensateurs du module précédent pour effectuer une correction du facteur de puissance.

Le dernier sous-système est composé d'éléments passifs. Trois modules avec différents types de charges (capacitifs, inductifs, résistifs) qui simulent les charges dans une maison ou une usine et deux modules avec des impédances simulant les pertes générées dans les lignes de transmission, spécifiquement en lignes de 10 et 100 km de longueur.

Un logiciel **SCADA** fournit à l'acquisition et au stockage des données provenant des instruments de mesure et au contrôle des actionneurs pour une gestion "intelligente" de l'ensemble du système électrique. Le logiciel SCADA peut également être fourni sur demande dans une version OUVERTE afin que l'enseignant puisse mettre en œuvre son propre projet et sélectionner les modes et procédures pour visualiser les paramètres et contrôler les actionneurs.

L'**Intelligence Artificielle** joue un rôle crucial: elle influence diverses techniques visant à améliorer l'efficacité et la fiabilité du réseau électrique. Grâce à l'apprentissage supervisé, à l'apprentissage par renforcement et à la détection d'anomalies, ces expériences optimisent la consommation d'énergie, prédisent la production d'énergie renouvelable et améliorent la stabilité du réseau. L'**IA** permet la détection des défauts, la maintenance proactive et le contrôle intelligent de la charge, réduisant ainsi les temps d'arrêt et renforçant la résilience. À la fin de la section **Expériences**, vous trouverez une description détaillée de chaque expérience, y compris son domaine d'**IA** et sa catégorie de machine learning.

Le système décrit ci-dessus représente la configuration de base de notre laboratoire (**DL SGWD-AI**).

**Optionnellement**, il est possible d'ajouter un système supplémentaire de production à petite échelle d'énergie éolienne, avec une éolienne réelle connectée à un module onduleur pour permettre la connexion au réseau (**DL SGWD-W-AI**).



## OBJECTIFS DE FORMATION



*Configuration spéciale préparée pour une exposition*

Le système *Smart Grid* peut être considéré comme un **laboratoire multidisciplinaire** car il permet d'étudier et d'exercer des différents sujets techniques qui sont ensuite intégrés dans une configuration complète du système de réseau intelligent.

Ce laboratoire est en effet un laboratoire intégré qui peut être utile pour un grand nombre de cours de premier cycle et d'études supérieures dans l'école d'ingénieurs. L'équipement de laboratoire peut être configuré pour créer différents exercices, qui renforcent les concepts fondamentaux et avancés en énergie électrique. L'équipement peut être interconnecté pour former **un système complet de réseau intelligent**. Cependant, comme vous pouvez le voir dans la liste des expériences du paragraphe suivant, les sujets classiques, tels que les machines électriques, les systèmes de distribution, etc., pourraient être couverts par le formateur *Smart Grid*; Ce laboratoire innovant peut inclure des démonstrations de classe et des expériences de laboratoire dans des classes régulières de laboratoire.

Il existe des sujets fondamentaux qui sont nécessaires pour comprendre le concept du réseau intelligent et ils doivent être liés à des situations réelles, toutefois, un ensemble de sujets différents pourrait être ajouté afin d'obtenir un programme d'études spécial. Les **principaux sujets** sont les suivants : circuits électriques, machines électriques, hydroélectricité, énergie éolienne, énergie solaire photovoltaïque, énergies renouvelables, transmission de puissance, distribution d'énergie.

En outre, des cours supplémentaires peuvent bénéficier du formateur de réseau intelligent, par exemple: ingénierie et analyse de systèmes électriques, machines électriques, systèmes de contrôle linéaire, ingénierie de distribution électrique et automatisation de réseaux intelligentes, fonctionnement et contrôle de production d'énergie, électronique de puissance, coût et Construction de l'alimentation électrique, stabilité du système d'alimentation, méthodes d'optimisation, processus stochastiques, systèmes embarqués.



# SMART GRID



Le système de réseau intelligent peut être utilisé par les étudiants ingénierie mécanique et électrique comme un projet de longue date car il comprend suffisamment d'éléments pour couvrir la plupart des sujets énumérés ci-dessus.

Les sujets particuliers des circuits électriques peuvent être étudiés à l'aide de modules de charge, permettant une compréhension complète des charges résistives, capacitives et inductives alimentées par alimentation CA ou CC. Un équipement protégé permet l'application de grandeurs électriques domestiques et industrielles ainsi que leur instrumentation. Les effets particuliers des charges inductives et la correction des facteurs de puissance sont des problèmes qui peuvent également être résolus.

L'étude des machines électriques à courant alternatif peut également être complétée par l'expérience pratique fournie par les générateurs synchrones et inductifs utilisés pour émettre un système éolien et une centrale hydroélectrique respectivement.

Les méthodes de synchronisation, les transformateurs de puissance et d'instrumentation et les phénomènes physiques internes peuvent être mesurés et étudiés comme éléments individuels ou dans le cadre de l'ensemble du système de distribution d'énergie.

L'ensemble du système peut être testé sous de nombreuses considérations car il est configurable, de sorte que différentes expériences peuvent être basées sur les mêmes principes. Lors de l'analyse des systèmes de distribution et des schémas de défaut, l'instrumentation et l'équipement logique peuvent fournir une flexibilité suffisante pour comprendre le processus entre génération d'énergie et utilisation, ainsi que des événements anormaux et leurs problèmes de relais de protection respectifs. De cette façon, les sujets ajoutés dans les programmes d'études concernant la gestion et la répartition de l'énergie peuvent également trouver une place dans le projet intégré de réseau intelligent à long terme, qui peut également être évalué sous des problèmes d'efficacité en fonction des conditions de charge ou des états des générateurs particuliers.

De cette façon, le réseau intelligent vu comme un ensemble de modules individuels ou comme un tout, permet à l'élève de progresser vers un seul objectif, en étudiant nécessairement, chaque domaine de manière individuelle, ce qui permet une compréhension complète de la théorie de réseaux intelligents, leur application, leurs capacités, ainsi que les étapes pertinentes de leur intégration.

Le système *Smart Grid* permet également de comprendre des **sujets avancés** comme la production d'énergie dans les éoliennes reliées au réseau électrique principal ou isolées comme micro-réseaux, afin que les élèves puissent comprendre des problèmes réels d'ingénierie qui sont impératifs dans le progrès de l'énergie. Donc, les cours de base et avancés peuvent être combinés dans le système des éoliennes. Par exemple, les générateurs éoliens comprennent un contrôleur de pas qui augmente l'efficacité énergétique et l'énergie générée est envoyée au réseau électrique central. Par conséquent, les étudiants doivent utiliser plusieurs sujets tels que les systèmes de contrôle, le contrôle numérique, les machines électriques, etc.

Comme exemple supplémentaire, une combinaison de 3 sources d'énergie peut être étudiée lorsqu'elles fournissent de l'énergie à la charge. Si la source conventionnelle est combinée à une énergie éolienne et hydroélectrique, l'étudiant sera capable de comprendre de manière claire le processus consistant à fournir de l'énergie à la charge par des énergies alternatives. De plus, des questions environnementales peuvent être incluses dans l'exercice (empreinte carbone).



# SMART GRID



Le nombre d'exercices et de sujets peut être élargi et l'élève est en mesure de proposer de nouvelles idées sur la façon de résoudre les problèmes qui affectent la société. Par conséquent, la motivation des étudiants est augmentée.

**En conclusion**, les cours d'ingénierie doivent couvrir des concepts expérimentaux qui augmentent les connaissances en ingénierie des étudiants, mais il n'est pas facile de trouver des systèmes expérimentaux permettant de combiner ces concepts.

Bien que le *Smart Grid* soit un problème assez complexe qui affecte l'énergie électrique, il pourrait être utilisé pour incliner des concepts de base comme des circuits électriques. Par conséquent, ce système comprend tous les éléments pour fournir une expérience réelle dans les programmes d'ingénierie mécanique et électrique et influencer sur les sujets avancés et fondamentaux dans les programmes d'études. Le *Smart Grid* est un système parfait pour enseigner et impliquer les étudiants dans les problèmes d'ingénierie expérimentale. En outre, l'élève peut faire face à des problèmes écologiques et économiques. L'utilisation expérimentale de l'énergie solaire et éolienne fournit des informations sur la façon dont les sources alternatives d'énergie électrique peuvent être utilisées à grande échelle et à petite échelle.

Notre proposition comprend des exercices avec le *Smart Grid* dans différents sujets. Ainsi, ce système est le conducteur pour la connexion des concepts théoriques et pratiques.



## **LISTE DES EXPERIENCES**

### **SYSTEME HYDROELECTRIQUE**

Brushless

Caractéristique du générateur sans charge

Caractéristique de charge du générateur

Caractéristiques de performance de régulation

Synchronisation automatique

Protection contre les surintensités

Protection contre les surtensions ou sous-tensions

Protection contre la surfréquence ou sous-fréquence

### **SYSTEME EOLIEN**

Relation entre le système de contrôle du pas de pale et le vent

Analyse des paramètres mécaniques dans un générateur d'induction

Analyse des paramètres électriques dans un générateur d'induction

### **SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE**

Caractérisation d'un panneau photovoltaïque sans charge

Caractérisation d'un panneau photovoltaïque avec une charge

Connexion d'un système photovoltaïque au réseau réel en utilisant un système de réseau d'onduleur monophasé

### **TRANSFORMATEUR**

Groupe vectoriel

Performance sans charge

Performance avec une charge

Performance asymétrique

Rendement en régulation

Transformateur de protection contre les surintensités

Transformateur de protection différentielle

### **TRANSMISSION**

Performance sans charge

Performance avec charge équilibrée

Charge ohmique-inductive

Charge ohmique-capacitive

Compensateur automatique

Ligne de transmission réseau radial

Ligne de transmission réseau maillé

Ligne de transmission : défaut à la terre et protection

Protection contre les défauts à la terre de la ligne de transmission

Protection contre sous tension de la ligne de transmission

Protection contre surtension de la ligne de transmission



# SMART GRID



## RESEAU INTELLIGENT

- Contribution de l'énergie solaire
- Contribution de l'hydroélectricité
- Contribution de la centrale éolienne

## RESEAU INTELLIGENT AMELIORE PAR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

- Prévision de la consommation énergétique
- Détection des défauts sur le réseau
- Optimisation de l'utilisation des énergies renouvelables
- Analyse de la stabilité du réseau électrique
- Contrôle intelligent de la charge





## RESEAU INTELLIGENT AMELIORE PAR L'IA

L'IA révolutionne le secteur de l'énergie en améliorant l'efficacité, la fiabilité et la durabilité. Cette étude présente une série d'expériences pilotées par l'IA axées sur des défis clés, tels que la prévision de la consommation d'énergie, la détection des pannes, l'optimisation des énergies renouvelables et la stabilité du réseau.

Utilisation de techniques avancées telles que l'apprentissage supervisé, l'apprentissage par renforcement et la détection d'anomalies.

Ci-dessous, vous trouverez les descriptions complètes de chaque expérience, ainsi que leur domaine d'IA et leur catégorie ML.

Nom et description de l'expérience	Zone IA	Catégorie de Machine Learning
<b>Prévisions de consommation d'énergie</b> Utiliser des modèles d'apprentissage automatique pour prévoir la consommation d'énergie, la production d'énergie renouvelable et le comportement global du système.	Machine Learning	Apprentissage supervisé (régression)
<b>Détection des pannes du réseau</b> Identifier les défauts et anomalies du réseau grâce à une surveillance en temps réel et à la reconnaissance de formes pilotées par l'IA.	Machine Learning	Apprentissage supervisé (classification)
<b>Optimiser l'utilisation des énergies renouvelables</b> Améliorer l'efficacité énergétique grâce à une utilisation optimisée des énergies renouvelables, à une gestion du stockage et à un équilibrage intelligent de la charge au sein des réseaux intelligents.	Optimisation/ Machine Learning	Apprentissage par renforcement
<b>Analyse de la stabilité du système électrique</b> Évaluer les performances, la stabilité et la fiabilité du réseau électrique grâce à l'analyse intelligente des données.	Apprentissage profond	Apprentissage supervisé (régression)
<b>Contrôle de charge intelligent</b> Mettre en œuvre des stratégies de contrôle adaptatif pour gérer les flux de puissance et maintenir la stabilité du réseau en temps réel.	Machine Learning	Apprentissage par renforcement





## MANUELS

Le système comprend un manuel d'expérimentation avec une description détaillée de toutes les expériences que nous suggérons pour le système.

En outre, le système est fourni avec un livre de 300 pages environ "CONCEPTIONS EXPÉRIMENTALES DE LA TECHNOLOGIE SMART GRID BASÉES SUR LE SMART GRID DE LORENZO ", rédigé par Dr. Pedro Ponce et Dr. Arturo Molina, du Tecnológico de Monterrey (Mexique).

Voici l'index complet:

### 1 Circuits électriques

#### 1.1 Analyse domaine de fréquence

- 1.1.1 Phaseurs
- 1.1.2 Impédances
- 1.1.3 Schémas phaseurs
- 1.1.4 Unité de mesure de phaseur
- 1.1.5 Exercices

#### 1.2 Analyse de puissance CA

- 1.2.1 Puissance Instantanée
- 1.2.2 Puissance moyenne
- 1.2.3 Valeurs efficaces ou valeurs RMS
- 1.2.4 Puissance apparente et facteur de puissance
- 1.2.5 Puissance complexe
- 1.2.6 Correction du facteur de puissance
- 1.2.7 Exercices

#### 1.3 Circuits polyphasés

- 1.3.1 Systèmes monophasés à trois fils
- 1.3.2 Tensions triphasées équilibrées
- 1.3.3 Connexion Y-Y équilibrée
- 1.3.4 Connexion équilibrée Y- $\Delta$
- 1.3.5 Connexion équilibrée  $\Delta$ - $\Delta$
- 1.3.6 Connexion équilibrée  $\Delta$ -Y
- 1.3.7 Systèmes triphasés non équilibrés
- 1.3.8 Puissance dans les systèmes triphasés
- 1.3.9 Exercices

#### 1.4 Harmoniques

- 1.4.1 Exercices

#### 1.5 Problèmes théoriques

#### Références

### 2 Machines électriques

#### 2.1 Machine électrique principale

- 2.1.1 Générateur
- 2.1.2 Transformateurs
  - 2.1.2.1 Transformateur de tension
  - 2.1.2.2 Transformateurs de courant
- 2.1.3 Lignes électriques
- 2.1.4 Charges
- 2.1.5 Lignes de transmission
- 2.1.6 Dispositifs de protection

#### 2.2 Mouvement de rotation, loi de Newton et les relations de puissance

- 2.2.1 Position angulaire
- 2.2.2 Vitesse angulaire
- 2.2.3 Accélération angulaire



# SMART GRID



## 2.2.4 Couple

### 2.3 Loi de Rotation de Newton

#### 2.3.1 Travail

#### 2.3.2 Puissance

### 2.4 Champ magnétique

### 2.5 Circuits couplés magnétiquement

### 2.6 Conversion d'énergie électromécanique

### 2.7 Enroulements de machine

### 2.8 Inductances d'enroulement

#### 2.8.1 Machine synchrone

#### 2.8.2 Machine à induction

##### 2.8.2.1 Test de charge

###### 2.8.2.1.1 Exercice test de générateur avec charge

###### 2.8.2.1.2 Exercice test de générateur sans charge

##### 2.8.2.2 Test de rotor bloqué

### 2.9 Moteur asynchrone

#### 2.9.1 Circuit équivalent du moteur à induction et graphique couple-vitesse

#### 2.9.2 Design National Electrical Manufacturers Association (NEMA)

#### 2.9.3 NEMA code de rupture

### 2.10 Moteur brushless

#### 2.10.1 Principe de fonctionnement

#### 2.10.2 Inductance et résistance dans les enroulements

#### 2.10.3 Exercice brushless

### 2.11 Problèmes théoriques

#### Références

## 3 Hydroélectricité

### 3.1 Caractéristiques générales et fonctionnement

#### 3.1.1 Exercices

### 3.2 Intégration avec le bus infini

#### 3.2.1 Exercices

### 3.3 Problèmes théoriques

#### Références

## 4 Énergie éolienne

### 4.1 Structure de base de l'éolienne

### 4.2 Production d'énergie éolique dans le monde

### 4.3 Les bases de l'énergie éolienne

### 4.4 Aérodynamique des éoliennes

#### 4.4.1 Profil aérodynamique

### 4.5 Turbines à vitesse constante versus turbines à vitesse variable

### 4.6 Ressource énergétique éolienne

### 4.7 Système de génération d'énergie

#### 4.7.1 Éoliennes à vitesse fixe

#### 4.7.2 Éoliennes à vitesse variable

#### 4.7.3 Exercices

### 4.8 Facteurs économiques

#### Références

## 5 Photovoltaïque

### 5.1 Introduction

#### 5.1.1 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

#### 5.1.2 Systèmes photovoltaïques autonomes

##### 5.1.2.1 Système photovoltaïque directement couplé à CC

##### 5.1.2.2 Systèmes photovoltaïques avec système de stockage d'énergie et batterie

##### 5.1.2.3 Système photovoltaïque avec onduleur

### 5.2 Caractéristiques générales et fonctionnement



# SMART GRID

## 5.2.1 Types de cellules

### 5.2.1.1 Procédés de base dans les cellules solaires organiques

## 5.3 Production d'énergie électrique

### 5.3.1 Dispositions photovoltaïques

#### 5.3.1.1 Connexion série

#### 5.3.1.2 Connexion parallèle

## 5.4 Réponse spectrale

### 5.4.1 Exemple

## 5.5 Circuit équivalent

## 5.6 Performance du système

## 5.7 Puissance maximale

## 5.8 Facteur de remplissage

## 5.9 Dégradation et efficacité du système

### 5.9.1 Efficacité de conversion photovoltaïque

## 5.10 Sortie d'un système d'alimentation solaire photovoltaïque typique

### 5.10.1 Exemple

## 5.11 Stockage de l'énergie électrique

### 5.11.1 Batteries

### 5.11.2 Structure des périphériques de stockage de puissance

### 5.11.3 Stockage de la batterie

### 5.11.4 Efficacité de la batterie

#### 5.11.4.1 Régulateurs de charge de la batterie

### 5.11.5 Exemple

## 5.12 Onduleurs

## 5.13 Coûts

### 5.13.1 Prix des modules photovoltaïques

### 5.13.2 Prix du système photovoltaïque

### 5.13.3 Coût nivelé d'énergie

### 5.13.4 Stratégies pour réduire les prix des systèmes photovoltaïques

### 5.13.5 Réduction des coûts des matériels

### 5.13.6 Amélioration du processus de fabrication

### 5.13.7 Réduction des coûts d'expédition du module

### 5.13.8 Augmentation de l'efficacité du module photovoltaïque

### 5.13.9 Réduction des coûts électroniques de la puissance

### 5.13.10 Réduction des coûts de balance des systèmes

## 5.14 Exercices

### 5.14.1 Contribution énergétique pour différents angles du panneau solaire

### 5.14.2 Efficacité énergétique due à la chaleur du panneau solaire

## Références

## 6 Paramètres de transmission d'énergie électrique

### 6.1 Structure générique d'une tour de transmission

### 6.2 Paramètres de ligne de transmission

#### 6.2.1 Résistance électrique

#### 6.2.2 Inductance

##### 6.2.2.1 Inductance due à la liaison interne du flux

##### 6.2.2.2 Inductance due à la liaison de flux externe

##### 6.2.2.3 Inductance totale

##### 6.2.2.4 Inductance dans un point P due à un système de conducteurs N

##### 6.2.2.5 Inductance dans l'infini

##### 6.2.2.6 Inductance d'un système monophasique

##### 6.2.2.7 Inductance d'un système triphasé

#### 6.2.3 Rayon moyen géométrique et distance moyenne géométrique

#### 6.2.4 Inductance des lignes triphasées à double circuit

#### 6.2.5 Capacitance des lignes de transmission



# SMART GRID



- 6.2.5.1 Capacitance d'une ligne monophasée
- 6.2.5.2 Capacitance d'une ligne triphasée
- 6.2.5.3 Effet de la terre sur la capacité des conducteurs

## 6.2.6 Exercices

### 6.3 Modèle mathématique de la ligne de transmission

- 6.3.1 Modèle ABCD exact d'une ligne de transmission
- 6.3.2 Circuit  $\pi$  équivalent
- 6.3.3 Exercices

### 6.4 Analyse du flux d'énergie

- 6.4.1 Exercices

### 6.5 Problèmes théoriques

- 6.5.1 Résistance électrique
- 6.5.2 Impédance du conducteur en trois phases
- 6.5.3 Capacitance des lignes de transmission
- 6.5.4 Modèle ABCD
- 6.5.5 Circuit  $\pi$  équivalent

### Références

## 7 Smart Grid

- 7.1.1 Facteurs économiques
- 7.1.2 Facteurs de fiabilité
- 7.1.3 Environnement
- 7.1.4 Sécurité
- 7.1.5 Perspective de l'industrie de la mesure

### 7.2 Exercices

- 7.2.1 Contribution de l'énergie solaire
- 7.2.2 Contribution de l'hydroélectricité
- 7.2.3 Contribution de la centrale éolienne

### Références

## 8 Énergie renouvelable

### 8.1 Sources et ressources d'énergie

### 8.2 Types d'énergie

### 8.3 Types d'énergies renouvelables

### 8.4 Avantages et désavantages

### 8.5 Stockage

- 8.5.1 Accumulation par pompage
- 8.5.2 Air comprimé
- 8.5.3 Volant d'inertie
- 8.5.4 Batteries
- 8.5.5 Parc éolien de Rokkasho-Futamata

### 8.6 Énergie et société

- 8.6.1 Utilisation de l'énergie

### 8.7 Economie

### 8.8 Solutions

### 8.9 Problèmes théoriques

### Références

## 9 Système de distribution d'énergie, pannes asymétriques et protections du système d'alimentation

### 9.1 Types de systèmes de distribution

- 9.1.1 Réseaux radiaux
  - 9.1.1.1 Réseaux radiaux aériens
  - 9.1.1.2 Réseaux radiaux souterrains
- 9.1.2 Réseaux de sonnerie
- 9.1.3 Réseaux de maillage
- 9.1.4 Exercices

### 9.2 Défaits sur les systèmes d'alimentation



# SMART GRID



- 9.2.1 Composants symétriques
- 9.2.2 Réseaux séquentiels de machines électriques
  - 9.2.2.1 Transformateurs
  - 9.2.2.2 Lignes de transmission et machines rotatives
- 9.2.3 Circuits couplés pour défauts asymétriques
  - 9.2.3.1 Défaut de ligne à terre
  - 9.2.3.2 Défaut ligne à ligne
  - 9.2.3.3 Double ligne à terre
  - 9.2.3.4 Résumé des circuits couplés

9.2.4 Exercices

## 9.3 Protections électriques

- 9.3.1 Types de défauts et de relais
- 9.3.2 Fonctionnement du relais

## 9.4 Opérateur de ligne électrique

## 9.5 Problèmes théoriques

- 9.5.1 Équivalent Thévenin
- 9.5.2 Types de défauts

## Références

## 10 ANNEXE 1: Composants du réseau intelligent



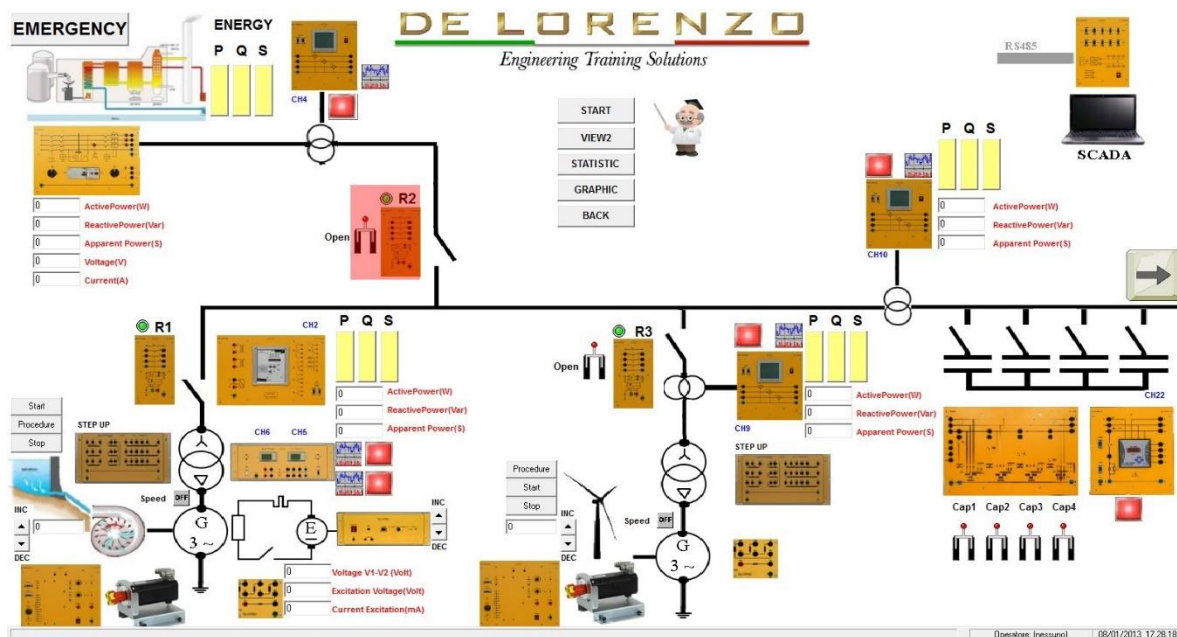
## EXEMPLE D'EXERCICE

### CONTRIBUTION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Supposons qu'il y ait une demande d'énergie d'un point éloigné et que l'énergie solaire puisse être exploitée. Dans cet exercice, l'élève intervient en réduisant la consommation d'énergie d'une usine d'ancienne génération, en utilisant l'excédent d'énergie produite par les systèmes solaires photovoltaïques.

La réduction d'énergie absorbée, même minimale, aura certainement un impact sur la pollution environnementale produite par une plante d'ancienne génération.

1. Réglez la charge DL 1017R en position 2 et fermez le relais R2 pour alimenter l'énergie provenant de l'usine de charbon.



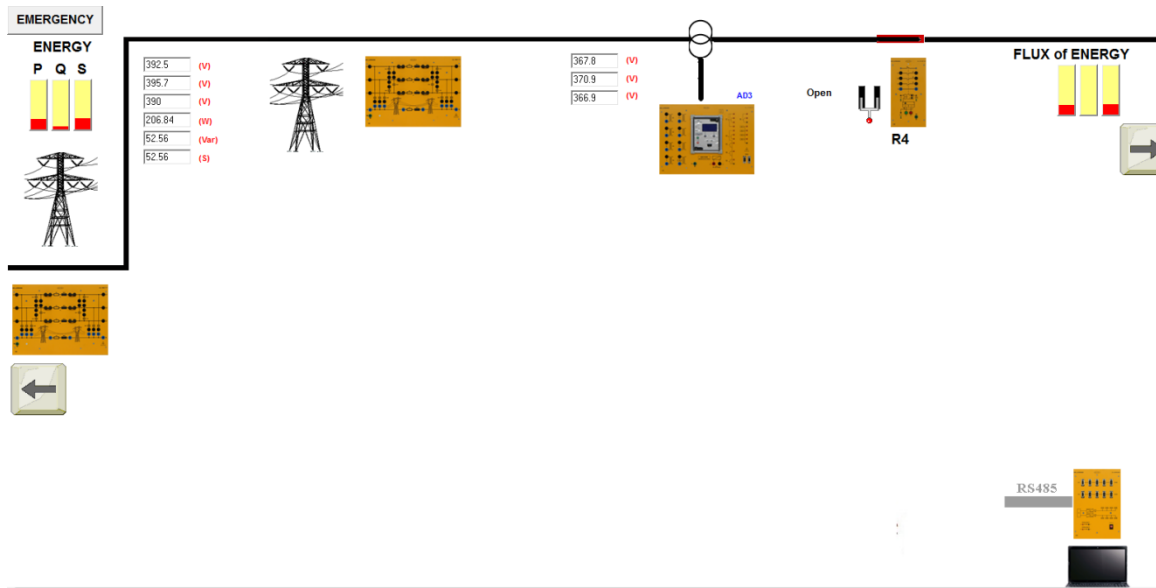
2. Fermez le relais R4 pour transférer l'énergie provenant de l'installation à la charge et observez la consommation de courant sur le module de DL 2109T29.

Position DL 1017R	Puissance active [W]	Puissance réactive [VAR]
2	207.64	52.32
3	310.00	101.00

Dans cette situation, vous pouvez voir la puissance active nécessaire à partir de la charge résistive (DL 1017R) et un peu de la puissance réactive nécessaire à partir du primaire du transformateur abaisseur.



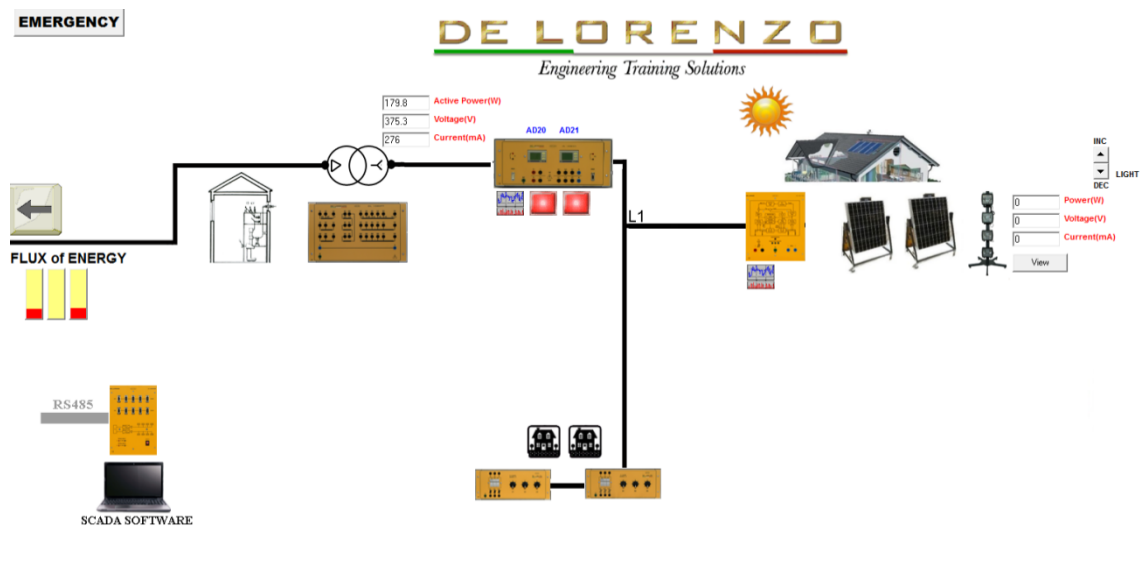
# SMART GRID



3. Observez la consommation de puissance active indiquée par la flèche rouge après le transformateur abaisseur secondaire.

Position DL 1017R	Puissance active [W]
2	179.9
3	275.1

Dans cette situation, l'énergie totale provenant de l'usine de charbon et dirigé à la charge. La longue distance parcourue par le courant produit une perte de puissance dans la ligne de transmission.





# SMART GRID



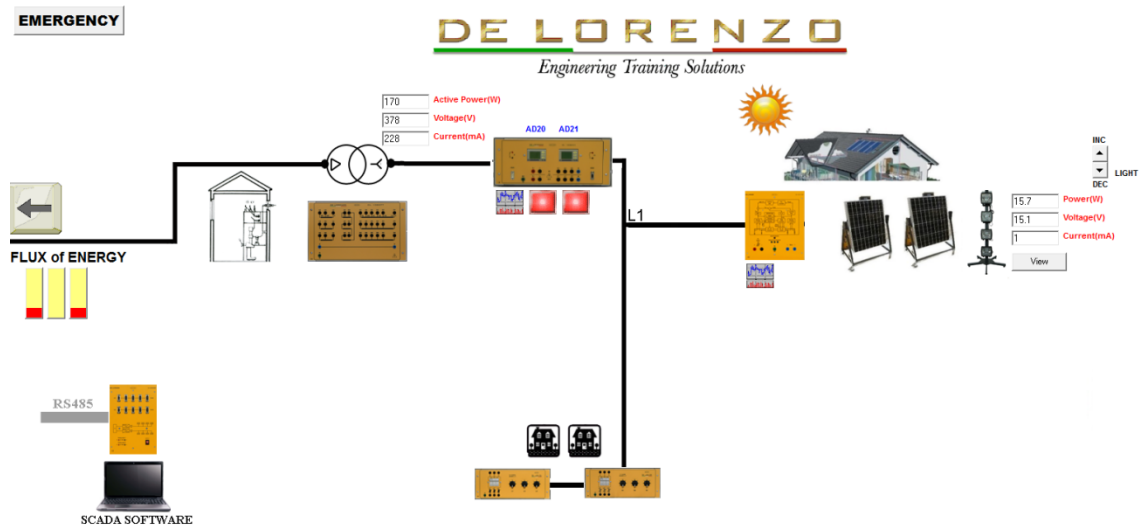
4. Augmentez l'énergie solaire et vérifiez la contribution de l'énergie provenant de l'installation du système photovoltaïque.

Position DL 1017R	Puissance active [W]
2	15.7
3	12.3

(Avec la lumière à 100% et le panneau à 90 °)

La puissance active provenant de l'usine de charbon sera réduite, ainsi que la quantité de CO<sub>2</sub> produite. Cette réduction de la puissance et par conséquent, de la pollution, représente une contribution à l'environnement.

La réduction de l'énergie est inférieure si vous utilisez l'éclairage artificiel, mais si vous orientez le panneau photovoltaïque au soleil réel, la contribution sera plus grande.





# SMART GRID



## DL SGWD-AI - LISTE DES MODULES

DL 2108T26	Moteur Brushless avec contrôleur	2
DL 1021/4	Moteur asynchrone triphasé à cage	1
DL 1013A	Base Universelle	2
DL 1026P4	Machine Synchrone Triphasée	1
DL 1017R	Charge Résistive	1
DL 1017L	Charge Inductive	1
DL 1017C	Charge Capacitive	1
DL 2108TAL-CP	Module D'alimentation Triphasée	1
DL 1067S	Alimentateur Motorisé	1
DL 7901TT	Modèle De Ligne – 360 Km	1
DL 7901TTS	Modèle De Ligne – 110 Km	1
DL 10065N	Unité De Mesure Numérique De Puissance Electrique	2
DL 2109T29	Compteur D'énergie Triphasée	3
DL 2108T25	Relais De Contrôle Du Synchronisme Et De Synchronisation	1
DL 2108T23	Relais Gestionnaire D'alimentation	1
DL 2108T02	Disjoncteur De Puissance	3
DL 2108T02A	Disjoncteur De Puissance	1
DL 2108T19	Régulateur De Puissance Réactive	1
DL 2108T20	Batterie De Condensateurs Commutables	1
DL 9031	Interrupteur Magnétothermique Différentiel	1
DL 9013G	Onduleur Réseau	1
PFS-85	Module De Panneau Solaire Photovoltaïque Inclinable	1
DL SIMSUN	Lampes pour panneau solaire photovoltaïque	1
DL WINDSIM	Simulateur Du Vent	1
DL HUBRS485F	Communication Modbus	1
DL SCADA-512	Logiciel SCADA dont la capacité est limitée à 512 étiquettes	1
DL AI-MODULE	Module d'intelligence artificielle	1
DL 1080TT	Transformateur Triphasé	3
DL 1155SGWD	Kit De Câbles De Connexion	1
DL T12090	Table de travail 120x90	3
DL T06090	Table de travail 60x90	1
DL A120-3M-LED	Cadre à Trois Niveaux	3
DL PCGRID	Ordinateur Personnel Tout-En-Un	1
DL 2100TTI	Transformateur d'isolement triphasé	1
DL 1196	Support pour câbles	1



# SMART GRID



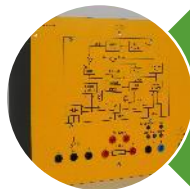
## Options:

- **Connexion au réseau de l'énergie éolienne.** Il permet d'ajouter un système d'énergie éolienne en parallèle au système solaire photovoltaïque dans la section d'utilisation du système.

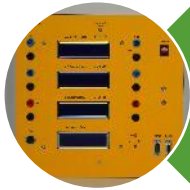
**Code de commande: DL SGWD-W-AI.**



Un micro-réseau éolienn alimentée par un servomoteur simulant l'action du vent.



Un onduleur monophasé raccordé au réseau qui alimente le réseau électrique de la turbine



Un instrument dédié fournit les informations nécessaires à la caractérisation du système éolien.

## Modules supplémentaires pour DL SGWD-AI-W, avec parc éolien Microgrid

DL T12090	Table de travail 120x90	1
DL A120-3M-LED	Cadre à Trois Niveaux	1
DL 9030	Compteur de puissance et d'énergie	1
DL 9032	Module distributeur de réseau	1
DL WTS-CTRL750	Module de commande pour moteur brushless 750W	1
ANEMOMETER	Module anémomètre	1
DL WTS-3	Simulateur	1
DL 9017	Module de lampe CA	1
DL 9013G3D	Onduleur réseau 300W 3ph. 12Vca avec résistance de freinage	1
DL 9027	Module de mesure pour éolienne	1
DL 9031	Interrupteur Magnétothermique Différentiel	1