Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 75 (1984)

Heft: 9

Artikel: Damier didactique modulaire

Autor: Aguet, M. / Schaedeli, B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904400

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 31.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Damier didactique modulaire

M. Aguet et B. Schaedeli

L'article présente un simulateur physique de réseau électrique permettant la formation des ingénieurs et du personnel confrontés à la construction et à l'exploitation des réseaux d'énergie électrique. Le concept modulaire donne une grande souplesse d'utilisation. Des applications particulières sont faites dans les concepts de protection des réseaux électriques et dans l'entraînement d'agents des centres de conduite.

In diesem Aufsatz wird ein physisches Netzmodell vorgestellt, an dem Ingenieure und Mitarbeiter ausgebildet werden können, die sich mit dem Bau und dem Betrieb von elektrischen Energienetzen zu befassen haben. Der modulare Aufbau bietet grosse Anpassungsmöglichkeiten in der Anwendung. Spezielle Verwendungszwecke der Anlage sind die Erarbeitung von Schutzkonzepten von elektrischen Netzen sowie die Schulung des Personals von Netzleitstellen.

Adresses des auteurs

M. Aguet, ingénieur adjoint du Service de l'électricité de la Ville de Lausanne, chargé de cours EPFL, rue de Genève 32, 1004 Lausanne.

B. Schaedeli, ingénieur d'exploitation, Laboratoire des réseaux d'énergie électrique, chemin de Bellerive 16, 1007 Lausanne.

1. Introduction

La formation des jeunes ingénieurs, concepteurs, constructeurs et exploitants de réseaux électriques à haute tension est confrontée, depuis un siècle environ, à la difficulté de passer des concepts théoriques acquis au travers de l'enseignement, à leur mise en pratique dans les réseaux. La difficulté majeure à laquelle on se heurte est due aux risques encourus lors du passage à un réseau en vraie grandeur où les puissances de court-circuit sont élevées. Cette situation interdit donc toute expérimentation, erreur de conception ou de conduite qui entraîneraient inévitablement des interruptions de service, voire même des dégâts matériels et des atteintes à des personnes.

Sur le plan théorique, les calculs concernant la planification, l'exploitation et la conduite des réseaux ont fait de grands bonds en avant, depuis les 20 dernières années, par l'introduction systématique du calcul numérique par ordinateur [1].

Sur le plan pratique, les appareils et les méthodes d'exploitation ont également fortement évolué depuis une vingtaine d'années. Citons à titre d'exemples les installations blindées isolées au SF_6, les appareils de coupure sous SF_6 et sous vide, les câbles et les condensateurs à isolation synthétique, les transformateurs de mesure modernes, les centres de conduite informatisés, les télétransmissions numériques, les logiques câblées et programmées, les liaisons par fibres optiques.

Au vu de l'évolution des réseaux électriques dans le futur qui seront confrontés à des difficultés d'approvisionnement de plus en plus grandes en regard d'une consommation de plus en plus forte, il sera nécessaire de disposer d'ingénieurs aptes à dominer des réseaux optimisés, sûrs et fiables.

Le Damier Didactique Modulaire (DDM), qui est un modèle de réseau évolutif, se situe à la charnière entre calculs théoriques et aspects pratiques des réseaux électriques. Le DDM offre également la possibilité de développer et de mettre en pratique l'aspect imaginatif, donc de génie propre du concepteur.

En résumé, le DDM est né, sur la base d'une idée d'Electricité de France [2], du besoin d'offrir une formation efficace dans le domaine des réseaux électriques au moyen d'un simulateur évolutif et non figé comme c'était le cas jusqu'à présent.

2. Buts

Les buts principaux du DDM sont:

- la formation des ingénieurs de réseaux électriques
- la formation à la conception des réseaux
- la formation à la conduite des réseaux
- la formation à la coordination des matériels [3]
- le test de logiques de commandes câblées ou programmées [4; 5]
- l'étude des protections de réseaux [6]
- la formation - l'étude des perturbations électriques conduites à basse fréquence (EMC) [7]
- le contrôle entre calculs numériques et vérifications expérimentales

3. Damier didactique modulaire

3.1 Concept

Le DDM est constitué par un (ou des) châssis de base comprenant 30 cases (fig. 1). Chaque case est apte à re-

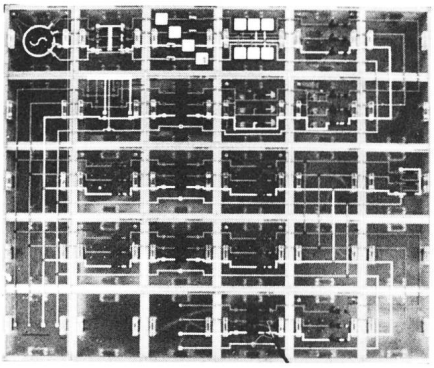

Fig. 1 Damier didactique modulaire (1600 × 1300 mm)

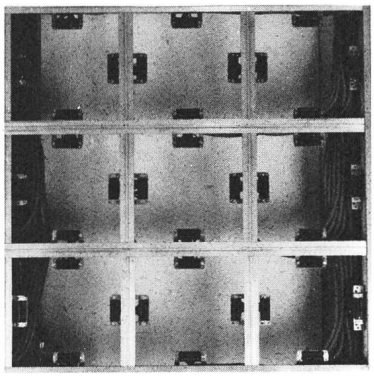

Fig. 2 Châssis du DDM équipé de connecteurs multiples

cevoir par enfichage un module représentant un élément de réseau. Chaque case est équipée de quatre connecteurs femelles à contacts multiples (fig. 2) assurant d'une part la continuité galvanique du réseau vers les modules adjacents et, d'autre part, les jonctions entre les circuits de mesure et de commande.

Le DDM permet donc de construire n'importe quelle portion de réseau électrique à condition d'avoir les modules nécessaires à disposition.

3.2 Système

Le réseau didactique modulaire (fig. 3 et 4) comprend un ou plusieurs panneaux didactiques, une ou plusieurs alimentations triphasées 380 V, 10 A réglables en module et en phase pour l'étude des réseaux bouclés, une matrice à clavettes permettant l'interconnexion des fonctions de mesure et de commande, un rack comprenant les relais électriques de mesure, de commande et de protection.

La tension maximum choisie pour le modèle est de 380 V, ce qui est de l'ordre de grandeur des tensions des circuits primaires de relais de protection et, de plus, garantit de bonnes conditions de sécurité pour les utilisateurs en fonction du matériel. Le courant maximum choisi, correspondant au courant de court-circuit permanent du modèle est de 10 A, ce qui est de l'ordre de grandeur des courants des circuits primaires des relais de protection et, de plus, est compatible avec les alimentations électriques courantes.

La puissance apparente du modèle ($S = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 10 \approx 6{,}6$ kVA) est environ 1000 à 100 000 fois inférieure à la puissance des réseaux réels. Mais elle est suffisante pour alimenter les appareils de mesure et de protection.

3.3 Modules

Concept: Les modules de dimension standard (250×250 mm) sont constitués d'une plaque de base en verre acrylique semi-transparent fumé. Sur la face avant du module muni de deux poignées figure le schéma synoptique sous forme de symboles graphiques (fig. 5), ainsi que les lampes témoins, appareils de mesure, bornes de connexion, interrupteurs locaux, etc. Sur la face arrière du module on trouve les connecteurs mâles à contacts multiples assurant simultanément l'interconnexion électrique avec le châssis de base et la fixation mécanique du module. L'élément physique du réseau est simulé au moyen d'un appareil modèle réduit.

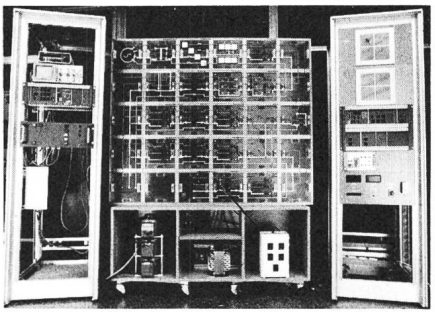

Fig. 4 Réseau didactique modulaire

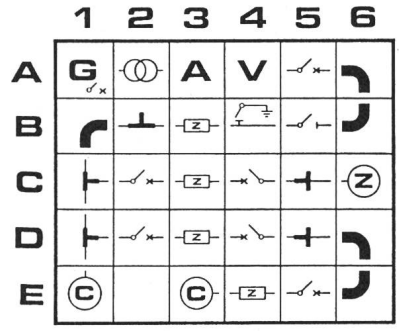

Fig. 5 Schéma synoptique des modules

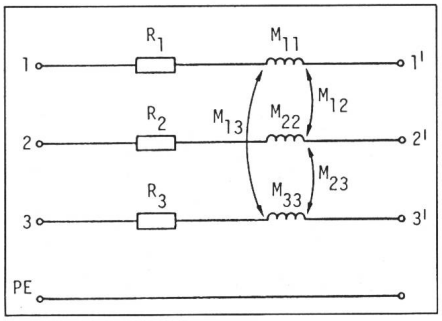

Fig. 6 Schéma équivalent d'une ligne

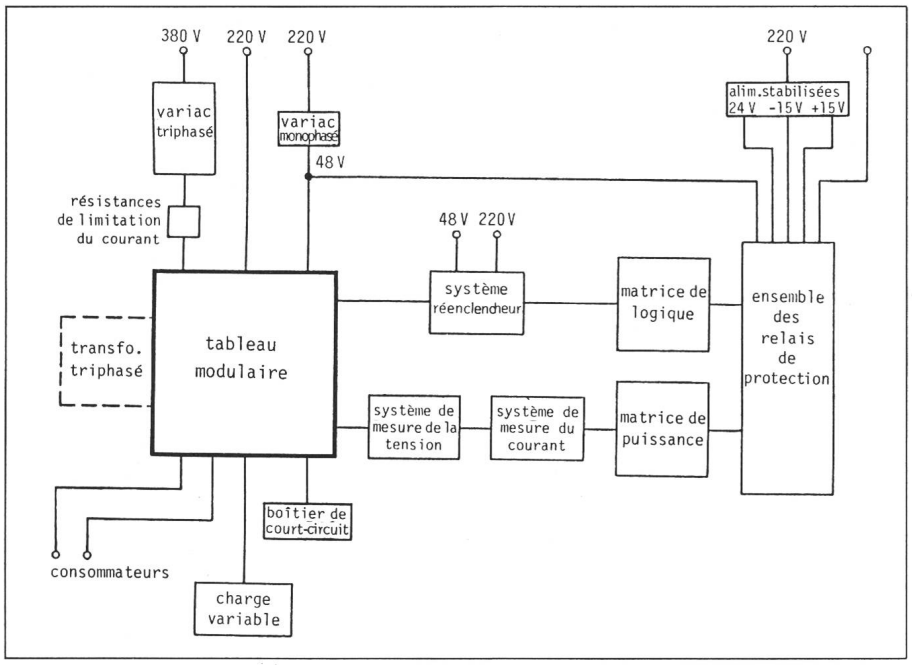

Fig. 3 Schéma bloc du réseau didactique modulaire

Modules jeu de barres: Les modules jeu de barres simulent les croisements de conducteurs dans un poste de couplage. On trouve des jeux de barre en piquage (T) ou traversant (+) interconnectés ou isolés (croisement). Des modules faisant partie de la même catégorie permettent d'introduire des angles droits sur une ligne ou un câble. Ces modules, à l'instar de tous les suivants, peuvent être placés dans l'une ou l'autre des quatre positions décalées de 90°. Les modules jeu de barres sont constitués physiquement par des liaisons galvaniques directes par conducteurs électriques.

Modules lignes et câbles: Les modules lignes et câbles (fig. 6) sont réalisés à partir de trois selfs à air pour éviter les phénomènes de saturation ma-

gnétique. Ces selfs sont disposées de façon à ce qu'une partie de leurs flux soient couplés, ce qui permet d'introduire en plus des inductances propres M_{ii} des inductances mutuelles M_{ij}. Les résistances R_i sont celles des enroulements des bobines.

A ce sujet, on peut remarquer qu'étant donné que les résistances et les réactances à fréquence de 50 Hz sont dans les mêmes ordres de grandeur, on est plus proche de la simulation des lignes moyenne et basse tensions que de celles à haute tension.

Si l'on désire introduire les effets capacitifs, ce qui est important particulièrement dans le cas des câbles, on peut rajouter des capacités propres et mutuelles concentrées.

Module transformateur: Ce module est constitué par trois transformateurs monophasés ou un transformateur triphasé, montés sur noyaux magnétiques. Tous les modes de couplage sont possibles par la souplesse offerte au niveau des connexions primaires et secondaires (fig. 7). Divers rapports de transformation peuvent être obtenus dans des valeurs n'excédant pas 5.

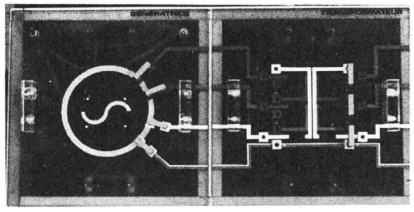

Fig. 7 Module génératrice et transformateur

Module sectionneur: Un sectionneur est simulé par un relais miniature permettant de couper un courant de 2 A sur charge ohmique. Lors de la coupure d'un court-circuit, limité à 10 A, des étincelles se manifestent entre les contacts du relais. Ces arcs électriques sont visualisés à travers le verre acrylique du module pour bien souligner à l'utilisateur l'erreur commise. Le sectionneur peut être commandé manuellement au moyen d'un interrupteur verrouillé ou par téléaction. Des lampes témoins (DEL) signalent la position des contacts.

Module disjoncteur: Un disjoncteur est simulé par un contacteur tripolaire permettant de couper 20 A sur une charge dont le cosφ est de 0,35 (fig. 8). La commande du disjoncteur est du même type que celle du sectionneur.

Module de mesure de tensions: Etant donné les niveaux de tension choisis

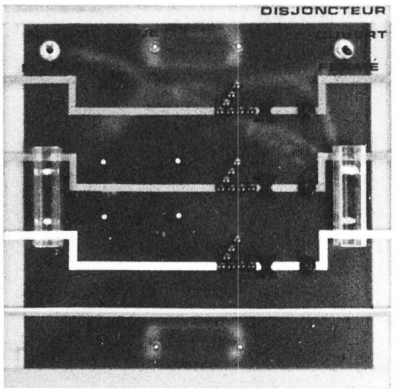

Fig. 8 Module disjoncteur

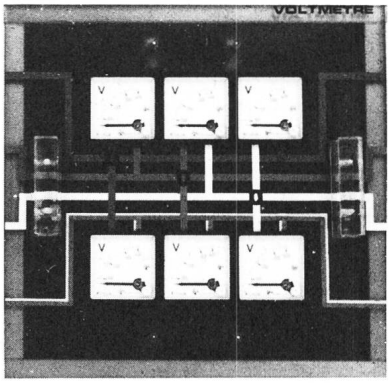

Fig. 9 Module mesure de tensions

Rangée du haut: mesure des tensions composées
Rangée du bas: mesure des tensions simples

pour le modèle (380 V), on pourrait directement connecter les appareils de mesure au réseau. Cette procédure comporte l'inconvénient de ne pas introduire un découplage galvanique entre le réseau de puissance et les circuits de mesure. En conséquence, on a introduit des transformateurs de mesure de tension de rapport de transformation 1:1. Ces transformateurs de tension sont directement reliés à des voltmètres de contrôles situés sur le module (fig. 9), ainsi qu'aux circuits de mesure, par l'intermédiaire des contacts embrochables.

Module de mesure de courant: Le module de mesure de courant (max. 10 A) est basé sur le même concept que celui de mesure de tension par l'adjonction de transformateurs de mesure de courant de rapport de transformation 1:1.

Module charge: Le module charge a été créé pour brancher un utilisateur, effectuer des couplages ⅄ ou △ avec point neutre flottant ou mis à la terre d'une manière aisée.

Boîtier court-circuiteur: Le boîtier court-circuiteur est destiné à choisir et à établir de manière rapide et en toute sécurité pour l'utilisateur, le type de court-circuit désiré en un point du réseau. Le boîtier permet cinq types de défaut différents: PT - PP - PPP - PPT - PPPT. La possibilité est offerte de choisir entre un court-circuit permanent ou fugitif.

4. Evaluation

4.1 Applications

Le DDM permet d'étudier:

- les réseaux en antenne
- les réseaux bouclés (à une source)
- les réseaux maillés (à deux sources et plus)
- les différents concepts de jeu de barres
- les caractéristiques de lignes et de câbles
- les répartitions de courant en régime permanent
- les régimes asymétriques
- les courants de court-circuit
- les puissances de court-circuit
- l'influence du couplage et du groupe horaire des transformateurs
- l'effet du facteur de mise à la terre
- l'effet des bobines de point neutre ou d'extinction (Petersen)
- la compensation shunt (capacités-selfs)
- la compensation série (capacités-selfs)
- la puissance naturelle
- l'effet Ferranti

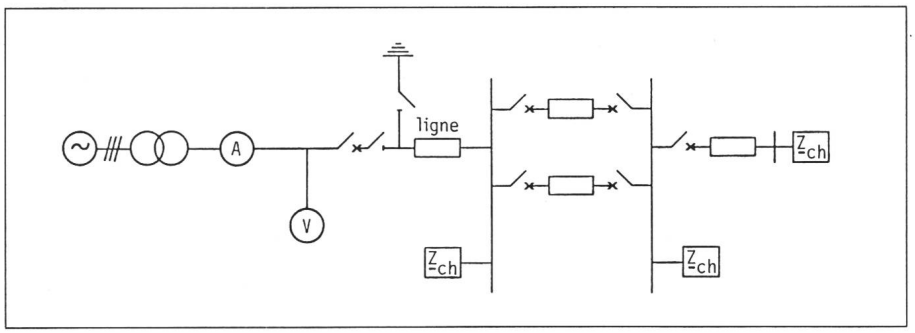

Fig. 10 Schéma unifilaire d'un réseau en antenne

Comparaison entre les résultats de mesure sur le DDM et de calculs dans le cas du réseau de la figure 11
(Court-circuit type RST et RSTN au nœud E; tension simple nominale: 220 V)

Tableau I

	I_R [A]			I_S [A]			I_T [A]		
	mesure	calcul analytique	calcul numérique	mesure	calcul analytique	calcul numérique	mesure	calucul analytique	calcul numérique
Génératrice	5,24	5,43	5,33	5,28	5,43	5,33	5,29	5,43	5,33
Transformateur									
primaire	5,24	5,43	5,33	5,28	5,43	5,33	5,29	5,43	5,33
secondaire	5,24	5,43	5,33	5,28	5,43	5,33	5,29	5,43	5,33
Lignes									
BC	5,24	5,43	5,33	5,28	5,43	5,33	5,29	5,43	5,33
CD 1	2,62	2,71	2,66	2,64	2,71	2,66	2,64	2,71	2,66
CD 2	2,62	2,71	2,66	2,64	2,71	2,66	2,65	2,71	2,66
DE	5,24	5,43	5,33	5,28	5,43	5,33	5,29	5,43	5,33

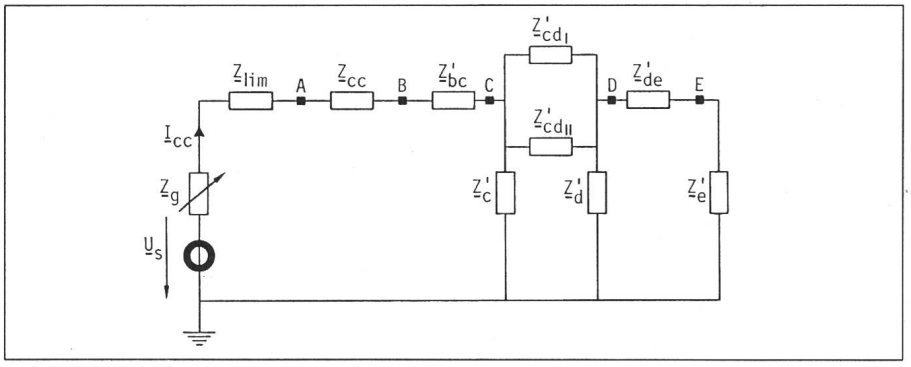

Fig. 11 Schéma équivalent du réseau en antenne rapporté à une phase

$\underline{U}_s$ tension simple de la source
$\underline{Z}_g$ impédance interne de la source
$\underline{Z}_{lim}$ impédance de limitation du courant de court-circuit
$\underline{Z}_{cc}$ impédance de court-circuit du transformateur
$\underline{Z}'_{ij}$ impédance de ligne en aval du transformateur, rapportée à la tension amont
$\underline{Z}'_k$ impédance de charge en aval du transformateur, rapportée à la tension amont

- les fréquences de résonance
- les fluctuations de tension
- les ferrorésonances
- les harmoniques
- les microcoupures
- les surtensions de manœuvre
- le comportement des charges
- l'estimation d'état
- les délestages
- les reconstructions de réseaux

La simulation des phénomènes à moyenne et à haute fréquence (1 kHz à 1 MHz resp. > 1 MHz) n'est pas possible car il faudrait introduire la simulation des effets parasites.

4.2 Utilisation

A titre d'exemple d'utilisation du DDM, on a pris le cas simple d'un réseau en antenne (fig. 10 et 11). Le tableau I présente les résultats de mesure et calculs effectués successivement par voie analytique [3] et au moyen d'un programme de calcul «Réseau» écrit en langage BASIC (fig. 12). Les résultats sont présentés pour des courts-circuits à l'extrémité de l'antenne (E) à caractère franc triphasé (PPP). Le couplage du transformateur est de type triangle-étoile dont le neutre est relié à la terre.

La comparaison entre la mesure et le calcul montre une bonne concordance (erreur de quelques %), ce qui est satisfaisant.

5. Conclusion

Le DDM a été utilisé depuis deux ans essentiellement à l'étude des concepts modernes de protection des réseaux électriques. Dans une phase ultérieure, on se propose de comman-

```
RESEAU MODULAIRE DIDACTIQUE
***************************
CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT
************************************


SCHEMA UNIFILAIRE DU RESEAU
___________________________


                                <1>
                             I------I
GEN--I-TRANSFO-I-------I------I-------I
                             I------I
                                <2>
NOEUD:
      A          B        C       D        E


VALEURS DES ELEMENTS DU RESEAU
______________________________
GENERATRICE          :
                  PUISSANCE NOMINALE:6KVA
                  TENSION NOMINALE   :380V
                  Z<G>+Z<LIM>=31,90 + J.1.27
 OHM
TRANSFORMATEUR  :
                  COUPLAGE D-Y?
                  PUISSANCE NOMINALE:8KVA
                  UNOM PRIM:380V
                  UNOM  SEC:380V
                  Z<CC>=1,43 + J.0.87 OHM
                  Z<HO>=2,14 + J.1.14 OHM
LIGNES               :
                  Z<BC> = 2,7 + J.2,8 OHM
                  Z<CD>1= 2,7 + J.2,8 OHM
                  Z<CD>2= 2,7 + J.2,8 OHM
                  Z<DE> = 2,7 + J.2,8 OHM
```

Fig. 12
Segment de listage de sortie du programme

der le DDM par une logique programmée, puis de le gérer par un ordinateur en ligne. Une utilisation en simulateur d'entraînement pour un centre de conduite de réseau est à l'étude.

Pour conclure, le DDM met en main de l'ingénieur du réseau électrique un simulateur physique concret et simple dans son utilisation. Un tel instrument constitue un complément utile à la simulation numérique des réseaux électriques.

Bibliographie

[1] *F. Ariatti* e.a.: Analyse des réseaux d'énergie électrique. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Publication 142, 1974.

[2] Matériel pour l'enseignement des lois de l'électricité. Document Ml. Gurcy-le-Chatel, Electricité de France, centre d'études et d'application pédagogiques, 1974.

[3] *M. Aguet* et *J.J. Morf:* Energie électrique. Traité d'électricité de l'EPFL, vol. XII. Lausanne, Presses Polytechniques Romandes, 1981.

[4] *O. Castello:* Clé des schémas électriques, électroniques et hydrauliques. Paris, Dunod, 1969.

[5] *R. Hahn:* Les automates programmables Simatic S5. Siemens Energie électrique, Informations, Produit -(1983)-, p. 28...29.

[6] *W. Kolbe* et *I. De Mesmaeker:* Nouvelles protections de distance LZ91 et LZ92 pour réseaux à moyenne et haute tension. Revue Brown Boveri 67(1980)3, p. 188...195.

[7] Compatibilité électromagnétique. Lausanne, Presses Polytechniques Romandes, 1983.