

GESTION INTELLIGENTE D'UN SYSTEME HYBRIDE PAR LA LOGIQUE FLOUE : APPLICATION AU SOUDAGE A L'ARC

SALIM MAHDAB¹, ABDELHAFID MOUALDIA²

Mots clés : Système d'énergie hybride ; Système de gestion d'énergie ; État de charge.

Cet article est une contribution à la mise en œuvre d'un système de gestion de l'énergie en temps réel (SGE) pour maximiser l'efficacité de la distribution de puissance dans un système hybride isolé contenant des modules photovoltaïques, une éolienne et un système de stockage d'énergie par batterie qui est utilisé comme source de secours. Cependant, l'hybridation de plusieurs sources nécessite un contrôle du flux de puissance. Pour cette raison, dans ce travail, une gestion de l'énergie appropriée est développée à l'aide d'un algorithme à base de règles déterministe floues pour contrôler le système multi-sources autonome proposé. Le SGE développé est testé et validé par une application de soudage à l'arc dans les sites industriels isolés situés dans une région reculée du Sahara Algérien.

1. INTRODUCTION

Les énergies renouvelables, telles que les énergies éolienne et solaire, ont fait l'objet au cours de ces dernières années d'une attention particulière en tant que solution pour affronter les problèmes causés par l'épuisement des énergies fossiles. Ceci a permis d'atténuer les effets des changements climatiques et aussi pour répondre à la croissance mondiale de la demande énergétique [1].

Dans les sites isolés, où le diesel est la seule source d'énergie électrique, les énergies renouvelables viennent également jouer un rôle très important en tant que solutions alternatives pour remplacer définitivement le diesel, ou fonctionner en hybridation avec le diesel pour diversifier les ressources énergétiques [2]. A titre comparatif l'énergie hybride peut répondre aux besoins énergétiques mieux que le diesel, en raison de son faible coût, de sa propreté et de son renouvellement [3,4].

L'activité de soudage qui est l'une des activités industrielles les plus demandées dans les sites isolés, comme le cas dans le sud de l'Algérie pour le soudage des pipelines, nécessite une alimentation électrique fiable. A cet effet, les fabricants offrent des postes à souder spéciaux, équipés de

Généralement les postes à souder à l'arc ont des alimentations à courant continu (dc) [5,6], qui peuvent être une source de courant constant ou une source de tension constante; une source à courant constant fait varier sa tension pour maintenir un courant de référence, tandis que qu'une source à tension constante fait varier son courant pour maintenir une tension de référence [7]. L'avènement des alimentations à découpage (switched mode power supply), et les modules transistor bipolaire à grille isolée (IGBT), les postes à souder sont devenus beaucoup plus performant, grâce aux convertisseurs statiques appelés onduleurs de soudage [8–10]. Il existe de nombreuses topologies d'onduleurs déjà utilisées dans les postes à souder, à savoir: flyback, half-bridge, push-pull, etc. [11,12].

Chaque topologie possède un schéma de commutation particulier, et conçu selon certains critères, comme le type de procédé de soudage, le niveau de courant de soudage, le coût, etc.

Dans ce travail, on s'intéresse essentiellement à l'élaboration d'un protocole de gestion d'un système hybride composé d'une petite éolienne et des panneaux solaires de quelques kilowatts, afin de les utiliser comme une alternative au groupe diesel installé dans certains postes à souder. Dans ce contexte, notre contribution est une stratégie de la gestion intelligente de l'énergie hybride avec le système de batterie,

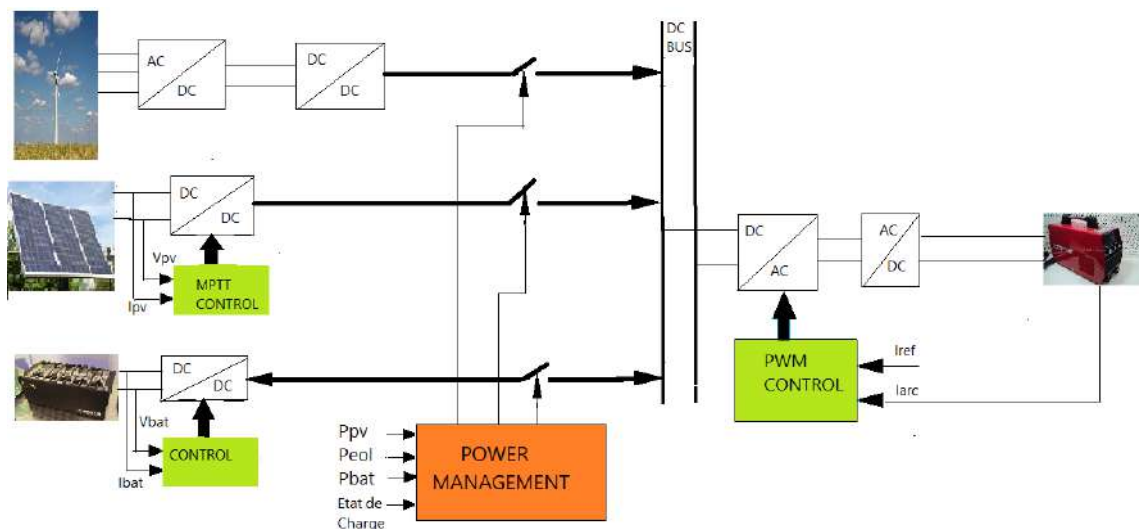


Fig. 1 – Description du système hybride de soudage.

groupes électrogènes, généralement de type diesel, pour pouvoir produire de l'électricité au poste à souder.

pour alimenter le poste à souder, et palier à toutes variations aléatoires des conditions climatiques et de la charge.

¹ Laboratoire de Recherche en Électrotechnique et en Automatique, Université de Medea, mahdabs@gmail.com

La gestion énergétique des sources exploitées avec un système de supervision basé sur un algorithme de logique floue qui permettra de pondérer les modes de fonctionnement utiles pour notre application au soudage à l'arc.

Une analyse objective des différents résultats de simulations obtenus sera détaillée pour être validée.

2. DESCRIPTION DU SYSTEME HYBRIDE PROPOSE POUR LE SOUDAGE A L'ARC

Le système hybride (fig1) conçu pour le soudage est basé sur un ensemble de panneaux photovoltaïque et une petite éolienne a vitesse variable, a entrainement direct avec une génératrice synchrone, a aimants permanents (GSAP). Le problème des fluctuations de la production éolienne et photovoltaïque est résolu par l'ajout des batteries de stockage. Pour la chaine éolienne: nous avons un étage de poursuite de la puissance maximale (MPTT) accompagné d'un régulateur approprié, d'un système de régulation de l'angle de calage.

Du côté photovoltaïque, le même processus de poursuite de la puissance maximale (MPTT) est utilisé. Enfin un système de dissipation d'énergie s'activera en cas de surplus de production.

Pour la charge : notre application, le soudage, nous avons opté pour un onduleur avec une topologie a pont complet (full-bridge) pour fournir le courant de l'arc.

3. GESTION DES ENERGIES

Il est évident que l'énergie hybride produite, par l'éolienne ou les panneaux solaires, est très fluctuante en raison du changement aléatoire de la vitesse du vent [13] et de l'ensoleillement. Autrement dit, la puissance produite peut être supérieure ou inférieure a la demande de l'arc. Afin d'optimiser le système global, une gestion d'énergie doit être établie. Dans notre cas, une stratégie est utilisée pour gérer la puissance hybride entre la demande de l'arc, la batterie et la dissipation. La charge prioritaire est celle de l'arc de soudage ; s'il y'a un surplus de puissance, il sera emmagasiné dans les batteries [14,15].

3.1 DIFFERENTS MODES DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME HYBRIDE

Notre système est constitué par un GPV d'une puissance de 8 kW, d'un aérogénérateur de puissance nominale égale à 8.5 kW et d'une batterie de 65 Ah et 24 V. Le SEH est conçu afin d'alimenter une charge principale dc et des charges supplémentaires. On considère que :

- *Les systèmes PV et l'éolien sont considérés comme des sources principales ;
- *La batterie est utilisée à la fois comme une source dans le cas d'un déficit de production, et comme une charge dans le cas d'une surproduction,
- *La charge principale dc est toujours connectée,
- *Les charges supplémentaires sont utilisées pour dissiper le surplus de production lorsque la batterie est complètement chargée.

3.2 SYSTEME DE SUPERVISION DU SEH

Nous avons proposé deux stratégies de gestion : la première consiste à considérer le système de conversion éolien comme étant la source principale pour alimenter la charge lorsque la puissance éolienne est supérieure ou égale à la puissance photovoltaïque, puis la deuxième considère plutôt le système de conversion photovoltaïque comme

étant la source principale pour alimenter la charge.

Pour ces deux stratégies, lorsqu'un système de conversion (éolien ou photovoltaïque) est considéré comme étant la source principale, l'autre système servira de source d'appoint et s'activera dès que le premier ne répond pas à la demande de source principale, la charge.

La batterie est utilisée à la fois comme source dans le cas d'un manque de production, et comme système de stockage dans le cas d'une surproduction.

Du fait que le système hybride est isolé, nous avons prévu une charge dissipative qui sert de "trop-plein" aux éventuelles surproductions représenté par la puissance supplémentaire (P_{sup}).

Equations illustrant la gestion de la puissance:

$$\Delta P0 = Peol - Ppv, \quad (1)$$

$$\Delta P1 = Peol - Pch, \quad (2)$$

$$\Delta P2 = Ppv - Pch, \quad (3)$$

$$\Delta P3 = Phybr - Pch, \quad (4)$$

Avec : $Peol$: la puissance éolienne, Ppv : la puissance photovoltaïque, Pch : la puissance de charge, $Phybr$: la somme des puissances éolienne et photovoltaïque.

Le principe de fonctionnement de ces deux stratégies de gestion est détaillé par les Tableaux (1) et (2).

Tableau 1

Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion avec système éolien source principale.

Mode	Pcharge	Pbatterie	SOC	P_{sup}
1	$Peol$	(Charge) $Pbat+Ppv$	<0.9	0
2	$Peol$	Repos	>=0.9	Ppv
3	$Peol$	(Charge) $Pbat+Ppv+\Delta P1$	<0.9	0
4	$Peol$	Repos	>=0.9	$\Delta P1+Ppv$
5	$Phybr$	Repos		0
6	$Phybr$	(Charge) $Pbat+\Delta P3$	<0.9	0
7	$Phybr$	Repos	>=0.9	$\Delta P3$
8	0	(Charge) $Pbat+Phybr$	<=0.3	0
9	$Phybr+Pbat$	(Decharge)	>0.3	0

Tableau 2

Stratégie de fonctionnement de bloc de gestion avec système photovoltaïque source principale.

Mode	Pcharge	Pbatterie	SOC	P_{sup}
10	Ppv	(Charge) $Pbat+Peol$	<0.9	0
11	Ppv	Repos	>=0.9	$Peol$
12	Ppv	(Charge) $Pbat+Peol+\Delta P2$	<0.9	0
13	Ppv	Repos	>=0.9	$\Delta P2+Peol$
14	$Phybr$	Repos		0
15	$Phybr$	(Charge) $Pbat+\Delta P3$	<0.9	0
16	$Phybr$	Repos	>=0.9	$\Delta P3$
17	0	(Charge) $Pbat+Phybr$	<=0.3	0
18	$Phybr+Pbat$	(Decharge)	>0.3	0

3.2.1 STRATEGIE DE GESTION A BASE DE REGLES FLOUES

Le concept des ensembles flous a été introduit en 1965 par Lotfi Zadeh comme moyen de représenter le flou dans les applications. La logique floue vise à modéliser un raisonnement imprécis ou de bon sens pour des processus incertains. C'est dans cette perspective que notre choix s'est porté pour l'utilisation de cette méthode.

La Fig. 5 illustre le système de supervision à base de la logique floue qui assure la gestion des flux de puissances entre les différentes parties.

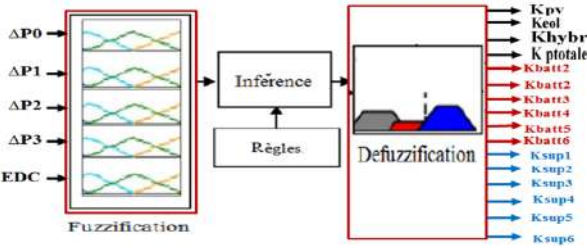


Fig2. – Système de supervision à base de la logique floue.

3.2.1.2 MISE EN ŒUVRE DU SYSTEME FLOU

Le contrôleur flou adopté pour la gestion de l'énergie utilise cinq variables d'entrées qui sont : $\Delta P0$, $\Delta P1$, $\Delta P2$, $\Delta P3$ et l'état de charge EDC .

Les variables de sortie du système étant les signaux de commande des interrupteurs :

- Kpv : interrupteur qui alimente la charge par la puissance Ppv;
- $Keol$: interrupteur qui alimente la charge par la puissance Peol;
- $Khybr$: interrupteur qui alimente la charge par la puissance Phybr;
- $Kptotale$: interrupteur qui alimente la charge par la puissance (Hybr + Pbatt);
- $Kbatt1$: interrupteur qui charge la batterie par la puissance Ppv ;
- $Kbatt2$: interrupteur qui charge la batterie par la puissance Peol ;
- $Kbatt3$: interrupteur qui charge la batterie par la puissance Phybr ;
- $Kbatt4$: interrupteur qui charge la batterie par la puissance Phybr-Pch ;
- $Kbatt5$: interrupteur qui charge la batterie par la puissance Ppv-Pch ;
- $Kbatt6$: interrupteur qui charge la batterie par la puissance Peol-Pch ;
- $Ksup1$: interrupteur qui alimente la charge supplémentaire par la puissance Ppv ;
- $Ksup2$: interrupteur qui alimente la charge supplémentaire par la puissance Peol ;
- $Ksup3$: interrupteur qui alimente la charge supplémentaire par la puissance Phybr ;
- $Ksup4$: interrupteur qui alimente la charge supplémentaire par la puissance Phybr-Pch ;
- $Ksup5$: interrupteur qui alimente la charge supplémentaire par la puissance Ppv-Pch ;
- $Ksup6$: interrupteur qui alimente la charge supplémentaire par la puissance Peol-Pch ;

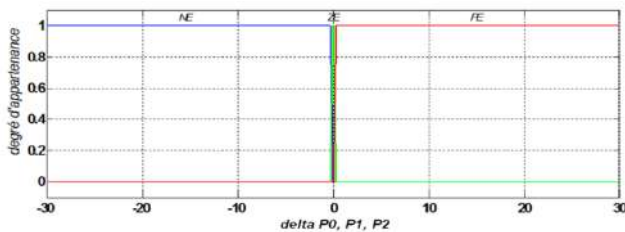


Fig. 3 – Fonctions d'appartenance de $\Delta P0$, $\Delta P1$, $\Delta P2$.

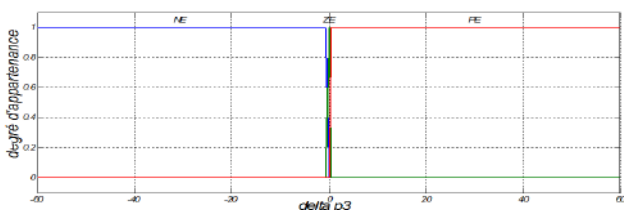


Fig. 4 – Fonctions d'appartenance de $\Delta P3$

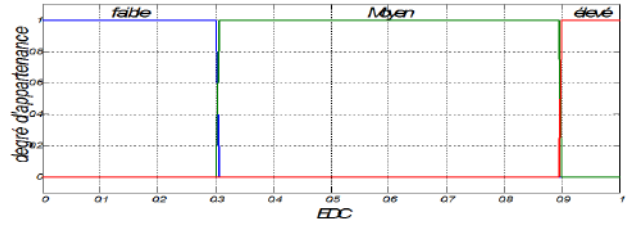


Fig. 5 – Fonctions d'appartenance de l'EDC

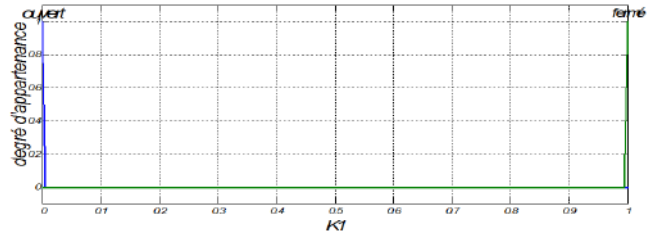


Fig. 6 – Fonctions d'appartenance des interrupteurs de sortie

3.2.1.4 CHOIX DES REGLES D'INFERENCE

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Elles lient les variables d'entrées à la variable de sortie linguistique à l'aide d'un certain nombre de règles.

Dans notre cas, nous avons utilisés 63 règles floues qui sont le résultat de pondération de trois tables règles floues de 21 chacune, correspondant à 03 états de charge (faible ; moyen et élevée). Nous donnons ici (Tableau 3) la table de règle floue pour un état de charge (EDC) moyen.

Les variables de sortie qui sont la commande des interrupteurs ne prennent que deux positions ouvert ou fermée et qui correspondent aux deux états logiques '0' et '1'.

Dans la table nous ne représentons que les interrupteurs qui sont à l'état logique '1' fermée, le reste des interrupteurs est automatiquement considérée à l'état '0' ouvert.

Tableau3

Table de 21 règles floues pour un état de charge (EDC) moyen.

EDC	$\Delta P0$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P3$		
				NE	ZE	PE
MO Y E N	NE	NE	NE	$Kbat3$	$Khybr$	$Khybr, Kbat3$
			ZE		$Kpv, Kbat1$	$Kpv, Kbat1$
			PE			$Kpv, Kbat1, Kbat5$
	ZE	NE	NE			$Kpv, Kbat1, Kbat5$
			ZE			$Kpv, Kbat1, Kbat5$
			PE			$Kpv, Kbat1, Kbat5$
	PE	NE	NE	$Kptot$	$Khybr$	$Khybr, kbat3$
			ZE			$keol, ksup6$
			PE			$keol, Kbat1$
MO Y E N	ZE	NE	NE			$keol, ksup6, kbat4$
			ZE			$keol, ksup6, kbat4$
			PE			$keol, ksup6, kbat4$

4. RESULTATS ET INTERPRETATION

Le but de ce travail est une contribution à l'élaboration

d'un algorithme de gestion de règles floue permettant d'alimenter un poste a souder utilisé pour souder des pipelines situés dans une région isolée à Adrar le sud d'Algérie, par un système hybride (photovoltaïque, éolienne plus la batterie). Pour cette raison on a fait une étude horaire sur les conditions climatiques (l'irradiation, la température et la vitesse du vent) d'Adrar pendant la durée d'une année [16,17].

Le temps de simulation est fixé à 24s qui est réellement équivalent à 24h.

Les conditions climatiques (l'irradiation, la température et la vitesse du vent) varient de la manière suivante :

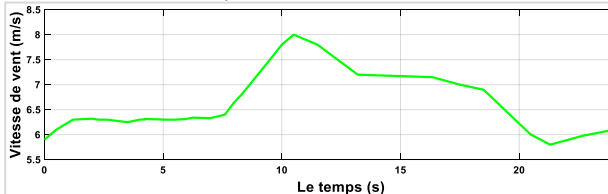


Fig. 7 – Evolution des données d'entrée: vent.

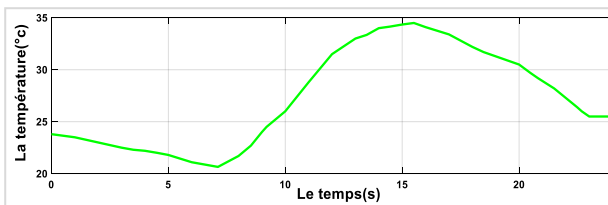


Fig. 8 – Evolution des données d'entrée: température.

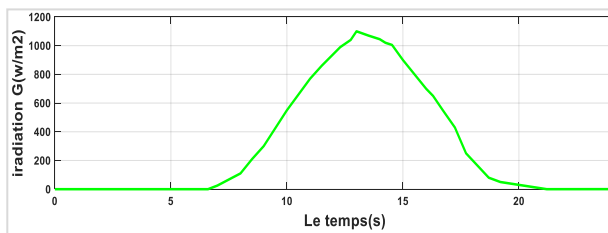


Fig. 9 – Evolution des données d'entrée: irradiation.

Le profil de puissance de la charge demandé qui permet le bon fonctionnement du poste a souder sans interruption, ainsi que les puissances générées du générateur éolien et photovoltaïques avec la puissance de la batterie de secours sont illustrés dans la figure suivante.

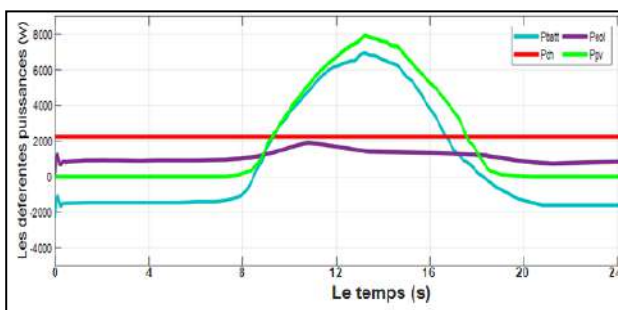


Fig. 10 – Profil des différentes puissances.

4.1 FIGURES DES DIFFERENTS MODES

La gestion du système se reflète sur le basculement des différents interrupteurs de commande qui détermine avec précision les intervalles de temps des puissances qui alimentent notre charge.

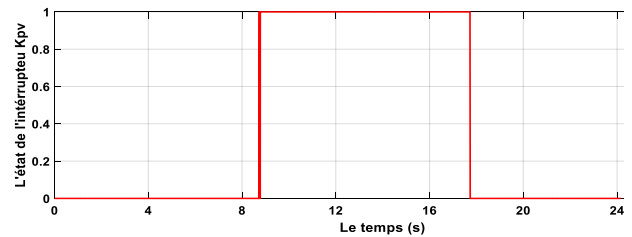


Fig. 11 – L'état d'interrupteur photovoltaïque.

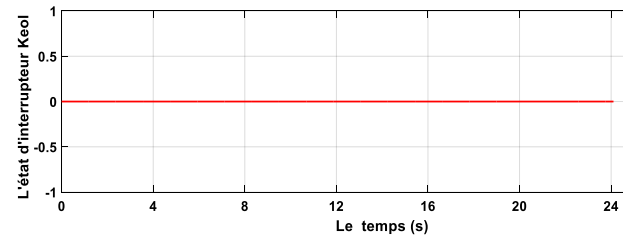


Fig. 12 – L'état d'interrupteur éolien

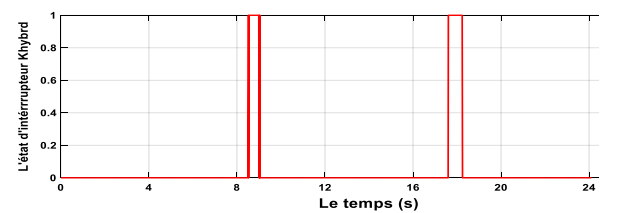


Fig. 13 – L'état d'interrupteur hybride.

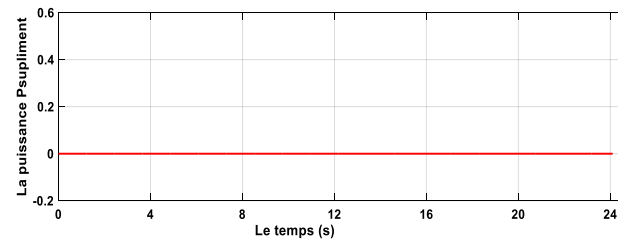


Fig. 14 – Puissance supplémentaire.

4.2 ANALYSE DES RESULTATS

L'état de charge de la batterie (voir Fig. 14) est toujours compris entre les limites de seuils minimum et maximum ($0.3 < EDC < 0.9$);

Phase 1: $t = [0 - 8.32]$ sec

La puissance issue du système photovoltaïque/éolien, est inférieure à la puissance demandée par la charge, et vu que $EDC_{min} (30\%) \geq EDC \geq EDC_{max} (90\%)$, la batterie se décharge pour satisfaire la charge.

Phase 2: $t = [8.32 - 8.55]$ sec

La puissance produite par le système hybride est supérieure à la puissance demandée par la charge, ce qui veut dire que la charge sera alimentée, et étant donné que $EDC < EDC_{max} (90\%)$, la batterie sera chargée par le surplus.

Phase 3: $t = [8.55 - 18.1]$ sec

La puissance produite par le système photovoltaïque est supérieure à la puissance produite par le système éolienne et la demande de la charge, ce qui veut dire que la charge sera alimentée par le système photovoltaïque, et la batterie sera charger par le surplus.

Phase 4: $t = [18.1 - 18.35]$ sec

Comportement identique à la phases 2

Phase 5: $t = [18.35 - 24]$ sec

Comportement identique à la phases 1 et la batterie se

décharge jusqu'à 48.3 %

On constate que notre charge est constamment alimentée.

4.3 APPLICATION

Cette application permet tester les performances du système de supervision pour une gestion de l'énergie du système hybride global appliqué au poste à souder à arc qui constitue notre charge principale.

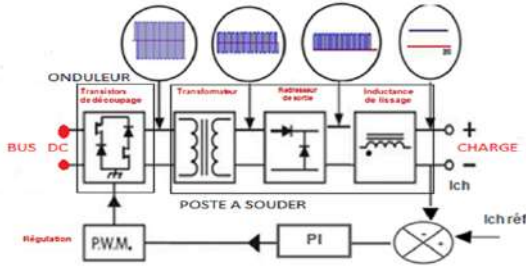


Fig. 15 – Poste a souder

Tableau 4

Paramètres de l'onduleur de soudage

Courant maximale de soudage	200 A
Tension de soudage a vide	65 V
Charge de l'arc	0.1 Ω
Inductance de lissage	200 μH
Rapport cyclique	0-40%

L'état de charge de la batterie est fixé à 50 % et notre consigne le courant de charge de référence à 150 A. Les principaux résultats de ce test sont représentés dans les figures suivantes:

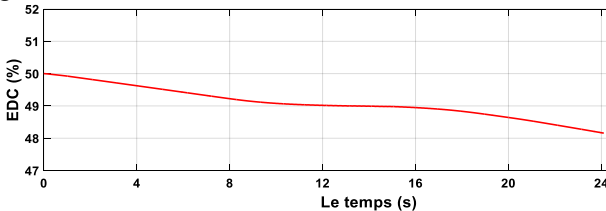


Fig. 16. – Evolution d'EDC.

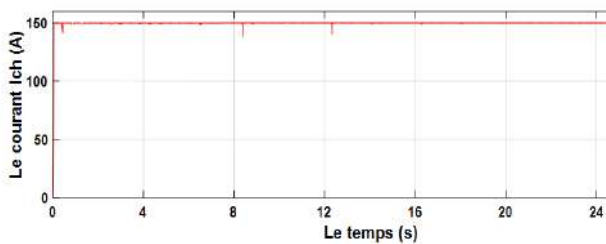


Fig. 17 – Evolution de courant de charge.

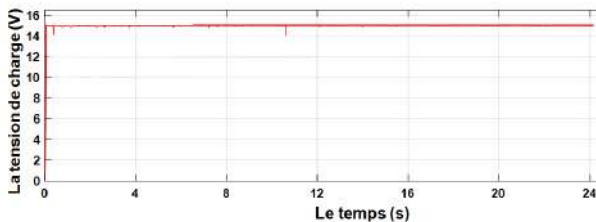


Fig. 18 – Évolution de la tension de charge

4.3.1 INTERPRETATION

La Fig. 14 montre que l'état de charge de la batterie (EDC) est maintenu durant toute les phases dans un seuil

très acceptable ($50 \% < EDC < 48.2 \%$) et permet a la batterie de prendre le relais .de.

Pour la régulation de la charge, on voit bien sur la Fig. (15) et la Fig. (16) que le courant de charge I_{ch} suit parfaitement le courant de charge de référence à une valeur de 150 A malgré les perturbations qui sont dues aux basculements des modes entre les différentes sources, et la tension de la charge est fixée à 15 V.

Ainsi, la satisfaction en terme de demande de puissance de notre poste a souder est fournie en permanence.

5. CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail était de développer un algorithme de gestion d'énergie d'un système hybride autonome: photovoltaïque/éolien et une batterie afin d'alimenter une charge isolée sans interruption, en adoptant une charge principale (un poste à soudé onduleur) et des charges auxiliaires dans la région d'Adrar au sud d'Algérie. Nous avons établi les modèles mathématiques qui décrivent le comportement des différentes parties du SEH. Le logiciel Matlab/Simulink, a été utilisé à cet effet. Afin d'optimiser l'énergie produite par les sources (PV et éolien), nous avons adopté un processus de commande de régulation du courant de la charge. La gestion d'énergie entre les différentes sources constituant notre système hybride: PV, éolien et la batterie, est assurée par une stratégie de gestion à base de règles déterministes floues. Les résultats de simulations obtenues sous diverses conditions permettent de conclure que la supervision de la gestion a été validée avec succès et la charge est toujours alimentée.

Tableau 4

Paramètres des composants du SHE. Panneau PV (KC200GT) en conditions standard ($G_n = 1000 \text{ W/m}^2$, et $T_n = 25 \text{ C}^\circ$)

Puissance maximale	Pmax	200 W
Tension de circuit-ouvert	Voc	32.9 V
Courant de court-circuit	Isc	8.21 A
Courant de saturation de la diode	Isat	$9.8214 \cdot 10^{-8} \text{ A}$
Photo-courant	Iph	8.214 A
Résistance série	Rs	0.221 Ω
Résistance parallèle	Rp	415.405 Ω
Facteur d'idéalité de la diode	A	1.3
Nombre de cellules PV connectées en série	Ns	54

Tableau 5

Système éolien. Caractéristiques électriques du turbine eolienne.

Rayon de la turbine	R	2.3 m
Frottement	F	$0.000425 \text{ N.m/ rd.s}^{-1}$
Moment d'inertie	J	0.0022 Kg. m^2
Nombre de pales	N	3
Masse volumique d'air	P	1.225 Kg/ m^3
Coefficient optimal	Kopt	$1.67 \cdot 10^{-3} \text{ Nm/ (rad/s)}^2$
Vitesse du vent nominal	V	12 m/s
vent nominal	V	12 m/s

Tableau 6
Paramètres de la MSAP.

Pairs de poles	P	6
Resistance statorique	Rs	0.425 Ω
Flux efficace	Φ	0.433 Wb
Inductance statorique	Ls	8,5 mH
Puissance nominale	Pn	8.5 kW

Tableau 7
Paramètres de la batterie plomb-acide.

Tension	Vn	24 V
Capacité nominale	Cn	65 Ah
Résistance	Rbatt	0.3 Ω

Reçu le 18 janvier, 2021.

REFERENCES

1. L. Barote, C. Marinencescu, M.N. Cirstea, *Control structure for single-phase stand-alone wind-based energy sources*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **60**, 2, pp. 764-772 (2013).
2. N. Mendis, K.M. Muttaqi, S. Perera, *Standalone operation of wind turbine-based variable speed generators with maximum power extraction capability*, IEEE Transactions on Energy Conversion, **27**, 4, pp. 882-834 (2012).
3. T. Ackerman, *Wind power in power systems*, John Wiley & Sons (2005).
4. C. Lumbreras, J.M. Guerrero, P. Garcia, F. Briz, D.D. Reigosa, *Control of small wind turbine in the high wind speed region*, IEEE Transactions on Power Electronics, **31**, 10, pp. 6980-6991 (2016).
5. D. Sha, X. Liao, *Control of switch-mode pulsed GMAW welding power*, Energy Conversion Congress And Exposition, pp. 2746-2749 (2009).
6. S. Narula, G. Bhuvaneswari, B.S Singh, *A modular converter for welding power supply with improved power quality*, International Conference on Power Electronics, Drives and Energy System (PEDES), pp. 1-4 (2012).
7. J. Zhu, W. Liang, Y. Shi, *Study on the dynamic process of arc welding inverter*, Third International Power Electronics and Motion Control Conference, **1**, pp. 308-311 (2000).
8. A.C. Davies, *The Science and Practice of Welding: Welding Science and Technology*, 10th Ed. Cambridge University Press, **1** (1992).
9. Y.M. Chae, J.S. Gho, W.S. Shin, J.Y. Choi, *PWM Converter-Inverter Arc Welding Machine Using New Type NCT*, Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Fukuoka, Japan, **2**, pp.1636-1641, May (1998).
10. A.K. Paul, *Robust product design using SOSM for control shielded metal arc-welding (SMAW)*, Proc. IEEE Transactions on Industrial Electronics, **63**, 6, pp. 3717-3724 (2016).
11. M. Pinard, *Convertisseurs et Electronique de Puissance*, Paris Dunod (2007).
12. B. Boussiala, M.O. Mahmoudi, Nezli, *Study and control of PWM arc welding based on microcontroller*, 2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN), Antalya, Turquie (2015).
13. Z. Hassiba, L. Cherif, M. Ali, *Optimal operation strategy of hybrid renewable energy system for rural electrification of a remote Algeria*, Energy Procedia, **36**, pp. 1060-1069 (2013).
14. N.A. Schinas, N.A. Vovos, G.B. Giannakopoulos, *An autonomous system supplied only by a pitch-controlled variable-speed wind turbine*, IEEE Transactions on Energy Conversion, **22**, 2, pp. 325-331 (2007).
15. K. Tan, Islam, *Optimum control strategy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, **19**, 2, pp. 392-399 (2004).
16. S. Diaf, G. Notton, *Technical and economic analysis of large-scale wind energy conversion systems in Algeria*, Renew. Sustain. Energy Rev., **19**, pp. 37-51 (2013).
17. R. Maouedja, A. Mammerra, M.D. Draoua, B. Benyoucef, *Techno-economic analysis of a standalone hybrid photovoltaic-wind system. application in electrification of a house in Adrar region*, Energy Procedia, **74**, pp. 1192-1204 (2015).