



HAL
open science

Influence de la répartition de la charge sur les performances d'une turbomachine axiale contrarotative

Juan Wang, Florent Ravelet, Farid Bakir, Christophe Sarraf

► **To cite this version:**

Juan Wang, Florent Ravelet, Farid Bakir, Christophe Sarraf. Influence de la répartition de la charge sur les performances d'une turbomachine axiale contrarotative. 2013. hal-00806763v1

HAL Id: hal-00806763

<https://hal.science/hal-00806763v1>

Preprint submitted on 2 Apr 2013 (v1), last revised 29 May 2013 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Influence de la répartition de la charge sur les performances d'une turbomachine axiale contrarotative

J. Wang^a, F. Ravelet^a, F. Bakir^a, C. Sarraf^a

a. DynFluid Lab., Arts et Metiers ParisTech, 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

Résumé :

Les ventilateurs axiaux contra-rotatifs peuvent contribuer à réduire la consommation, la masse et le volume dans de nombreux domaines industriels. La conception et l'optimisation d'un tel système sont des défis technologiques et scientifiques, notamment à cause de phénomènes très complexes produits par l'interaction de flux hautement instationnaires entre les deux rotors. Des mesures expérimentales des performances globales, des fluctuations de pression et de vitesse sur un premier système ont permis de valider une méthode de conception, puis d'étudier l'effet de la distance entre les deux rotors et du rapport des vitesses de rotation. Les résultats montrent une étonnante plage de fonctionnement optimale. Nous présentons ici un ensemble de résultats comparant les performances de quatre systèmes contra-rotatifs dessinés pour le même point et présentant des variations de la répartition de charge entre rotors, ainsi que de la pente de la caractéristique du premier rotor. De plus, nous explorons les effets de ces paramètres sur l'étendue de la plage de fonctionnement optimale.

Abstract :

Due to high requirements of energy consumption level, weight and dimension restriction in many industrial fields, compact axial turbomachines are expected. Counter-rotating axial-flow fans may be a solution. The design and optimization of such a system is a scientific and technological challenge, particularly because of very complex phenomena produced by the interaction of highly unsteady flows. Experimental measurements of overall performance, wall pressure fluctuations and velocity have been performed on a reference system. The design method has first been validated, and the effects of the distance between the two rotors and of the rotational speed ratio have been studied. The results show a surprising optimum operating range. We present a set of results comparing the performance of four contra-rotating systems designed for the same point and having variations in the distribution of load between the rotors, and the slope of the characteristic of the first rotor as well. In addition, we explore the effects of these parameters on the extent of the optimum operating range.

Mots clefs : répartition de la charge ; ventilateurs contra rotatifs ; turbomachine axiale

1 Introduction

Les machines avec deux rotors contra-rotatifs sont une solution prometteuse, pour réduire la consommation d'énergie, la masse et le volume dans de nombreuses applications industrielles subsoniques [2, 7, 5]. De tels ventilateurs sont par exemple développés par l'entreprise SANYO DENKI dans le domaine du refroidissement de composants électroniques. Selon Yoshihiko [7], par rapport à deux ventilateurs utilisés en série, les avantages d'un ventilateur contra-rotatif sont d'accéder à la fois à un plus grand débit d'air associé à une importante augmentation de la pression statique, de réduire les bruits émis et la consommation d'énergie [5].

Un étage de turbomachine contra-rotative est composé de deux rotors tournant dans en sens opposés : le rotor amont (FR) et le rotor aval (RR). Le rôle du rotor aval est double : d'une part il permet de redresser l'écoulement issu du premier rotor, à la manière d'un diffuseur convertissant l'énergie

cinétique de rotation en énergie de pression statique ; et d'autre part il contribue par sa rotation à communiquer du une énergie supplémentaire au fluide.

Une conception efficace de tels systèmes reste à développer [1, 4, 6]. La présence des deux rotors conduit en effet à introduire de nouveaux paramètres libres pour la conception, comme la répartition de charge entre rotors, la distance et le rapport des diamètres ou des vitesses de rotation, *etc.* Une méthode originale pour concevoir l'étage contra-rotatif a été développée au laboratoire Dynfluid [3, 4]. Un premier système, dénommé ci-après HSN a été largement étudié. Les résultats principaux en termes de performances globales pour ce système de référence sont :

- Le point nominal (défini comme le point de rendement maximum mesuré expérimentalement) de l'étage est très proche du point de conception. Le débit nominal Q_n est celui de conception, et l'élévation de pression est inférieure de 10% au souhait. Le rendement statique nominal de l'étage η_s est d'environ $65.5 \pm 1\%$.
- L'étage contra-rotatif a une grande plage de fonctionnement avec un rendement élevé : $60\% \leq \eta_s \leq 65\%$ pour $76\% \leq Q/Q_n \leq 115\%$. Ceci pourrait être lié à la caractéristique du rotor amont (FR) très plate.
- En variant le rapport des vitesses de rotation des deux rotors $\theta = N_{RR}/N_{FR}$, le système garde un très bon rendement statique. La valeur de conception est $\theta_c = 0.9$ et les résultats obtenus sont, pour les points nominaux, $\eta_s \geq 60\%$ pour $0.8 \leq \theta \leq 2$, avec un optimum des optima $\eta_s = 67 \pm 1\%$ pour $\theta = 1.05$.

Les travaux rapportés ici sont motivés par le fait que, dans la mesure de nos connaissances, l'influence de la répartition de charge entre rotors a été peu étudiée. Pour cela, trois nouveaux systèmes contra-rotatifs sont conçus en conservant le même cahier des charges, mais en variant certains paramètres de conception comme la répartition du travail, les vitesses de rotation, le calage des pales, *etc.* Les performances globales sur les trois étages et sur les rotors amonts seuls sont étudiées, de même que l'effet de la variation du rapport de vitesse θ .

2 Conception des trois systèmes avec répartition de charge variée

2.1 Système référence HSN

Le rotor amont (FR) de l'étage HSN a été conçu par MFT, code élaboré au laboratoire, basé sur la méthode inverse. Le comportement du FR peut être analysé par la méthode directe proposée par MFT, basée sur des corrélations empiriques de grilles d'aubes et des modèles de pertes, qui permet de vérifier si le point de conception est bien respecté. Le rotor aval (RR) est alors dessiné de sorte à apporter le complément à l'élévation de pression totale de l'étage, et à redresser l'écoulement sortant de FR. Les détails de la méthode sont décrits en Ref. [3]. Les paramètres principaux de l'étage HSN sont exposés dans le tableau 1. Cette méthode de conception conduit à des rotors avals non conventionnels avec des calages évoluant de manière non monotone du pied à la périphérie.

2.2 Détails de la conception des trois systèmes

Pour rechercher l'influence de la répartition de charge, trois nouveaux systèmes ont été conçus par la même méthode. Les quatre étages sont dessinés pour la même élévation de pression totale $\Delta P_{tC} =$

	N_{FR}/N_{RR} (rpm)	θ_C	L	Z_{FR}/Z_{RR}	R_{hub} (mm)	R_{tip} (mm)	Particularités
HSN	2000/1800	0.9	39.1%	11/7	55	187.5	faible γ
JW1	2300/2200	0.96	41.1%	10/7	65	187.5	fort γ
JW2	1800/2600	1.44	51.7 %	13/7	65	187.5	faible γ
JW3	2600/1100	0.423	23.3%	10/7	65	187.5	fort γ

TABLE 1 – Paramètres dimensionnants des quatre étages. N_{FR} : vitesse de rotation nominale du FR ; θ_C : rapport des vitesses de rotation nominal ; Z : nombre de pales ; R : rayon(mm) ; γ : calage des pales

420 Pa pour le débit volumique $Q_C = 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le facteur de la répartition de charge est défini par le rapport entre l'élévation de pression totale de RR et la pression totale de l'étage : $L = \frac{\Delta P_{tRR}}{\Delta P_{tFRC} + \Delta P_{tRR}}$. Les détails des nouveaux systèmes sont présentés dans le tableau 1. Les quatre systèmes ont différents L pour le même point de conception. Les trois nouveaux systèmes ont un rayon de moyeu R_{hub} plus important que celui de HSN, afin d'améliorer un problème de recirculation liée à la présence du moteur [3].

JW1 a une répartition de charge L proche du système de référence HSN. Ce système a été conçu avec un calage γ élevé pour les pales de FR dans le but d'obtenir une courbe de performance raide (Fig. 1) afin d'étudier l'influence du comportement de FR sur l'étendue de la plage de fonctionnement à haut rendement. L'analyse directe par MFT montre une courbe de l'élévation de pression statique ΔP_s (voir définition au § 3) en fonction de Q conforme aux attentes.

Parmi les systèmes étudiés, JW2 réalise le plus grand L , c'est-à-dire que RR2 communique plus d'énergie au fluide que FR2. Le faible calage des pales de FR2 est choisi dans l'idée d'avoir une caractéristique plus plate. L'idée du JW3 est d'étudier un cas extrême où FR3 réalise 76.7% de l'élévation de pression totale du système et possède une caractéristique très raide.

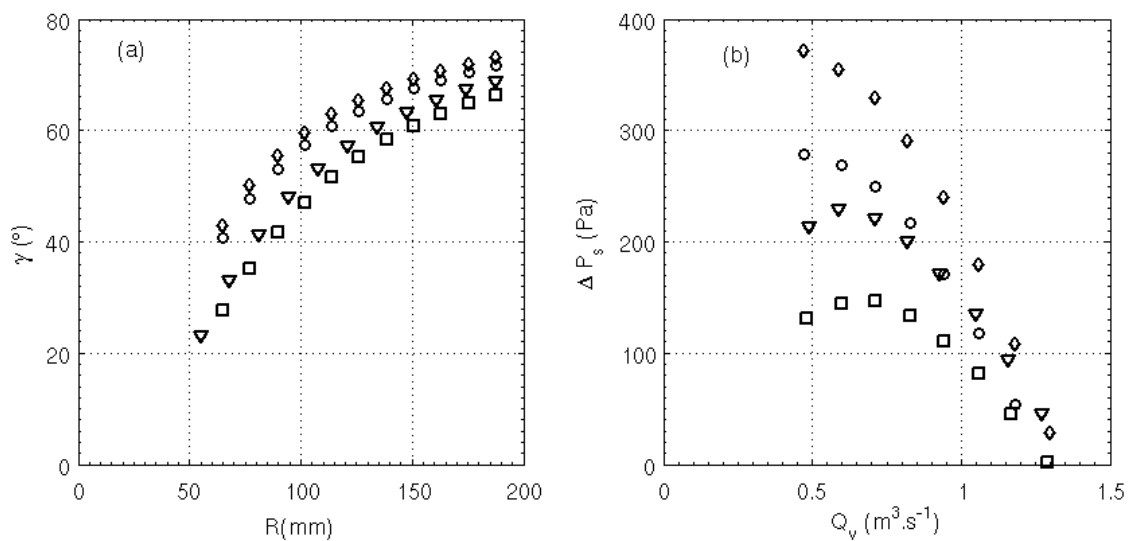


FIGURE 1 – (a) : Profil du calage γ des pales (degrés) et (b) : élévation de pression statique calculée par un modèle semi-empirique des rotors amonts FR1 du JW1 (\circ); FR2 du JW2 (\square); FR3 du JW3 (\diamond) et FRH du HSN (∇)

3 Méthode expérimentale

Tous les systèmes sont testés sur un banc d'essais normalisé : *AERO²FANS*, construit au Laboratoire Dynfluid [3]. Dans ce document, l'élévation de pression statique est définie selon la norme ISO-5801 par la différence entre la pression statique en aval de la machine étudiée et la pression totale en entrée (pression atmosphérique). La valeur est obtenue par la moyenne de quatre prises de pression situées en aval d'un redresseur, puis corrigée par la perte de charge du conduit mesuré sans rotor. Ainsi, la pression statique de conception est $\Delta P_{sC} = \Delta P_{tC} - \frac{1}{2} \rho_{ref} \left(\frac{Q_C}{\pi D^2 / 4} \right)^2 \simeq 373 \text{ Pa}$, avec $D = 380 \text{ mm}$ le diamètre du conduit, et $\rho_{ref} = 1.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ une masse volumique de référence. La pression atmosphérique, la température et le taux d'humidité de l'air sont mesurés, et les pressions statiques mesurées sont ramenées à cette valeur de référence. Le rendement statique est défini par $\eta_s = \frac{\Delta P_s Q}{(\tau_{FR} \omega_{FR}) + (\tau_{RR} \omega_{RR})}$. Les couples τ sont mesurés par les variateurs des moteurs synchrones à aimants permanents, et ont été au préalable calibrés par un couplemètre rotatif à jauge de contrainte externe. La distance axiale entre les rotors pour les quatre systèmes est $S = 40 \text{ mm}$.

Les incertitudes ont été analysées par Nouri et al. [4]. L'incertitude sur le débit est de l'ordre de $\pm 0.5\%$,

celle sur la pression statique est de ± 2 à ± 5 Pa, et celle sur le rendement statique est égale $\pm 1\%$.

4 Présentation et analyse des résultats

4.1 Comparaison des performances de 4 systèmes contra rotatifs conçus pour le même point de fonctionnement

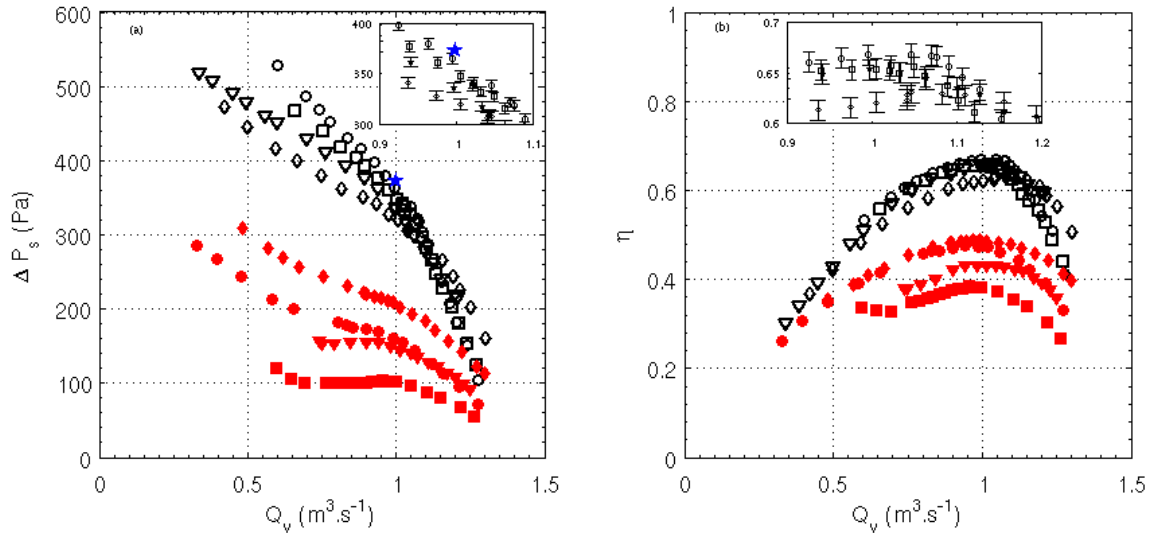


FIGURE 2 – performance des quatre systèmes contra rotatifs au point de conception : étage JW1 (○) ; étage JW2 (□) ; étage JW3 (◇) ; étage HSN (▽) ; FR1 (●) ; FR2 (■) ; FR3 (◆) ; FRH (▼) ; point de conception (★)

La figure 2 présente les courbes de performance des étages des 4 systèmes et aussi des FR seuls. A première vue, ces quatre étages si différents ont des courbes très similaires.

Au niveau des forme des courbes, on peut remarquer :

- Premièrement, les courbes de ΔP_s pour les rotors amonts sont caractérisées par des pentes locales autour du débit de conception ($Q_C = 1$ m³.s⁻¹) plus raides pour FR1 et FR3 que pour FR2 et FRH. Ce résultat est conforme à la conception décrite au tableau 1.
- Deuxièmement, on compare JW1 et HSN ayant des répartitions de charge similaires de l'ordre de $L = 40\%$. On peut noter que la pente locale autour de Q_C de la caractéristique de l'étage augmente légèrement (de -39 Pa.m³.s pour HSN à -56 Pa.m³.s pour JW1) quand la pente du FR s'élève (de -1 Pa.m³.s pour FRH à -15 Pa.m³.s pour FR1).
- Enfin, les pente des étages JW1 et JW2 sont semblables, de l'ordre de -56 Pa.m³.s et -49 Pa.m³.s, respectivement. En revanche, les pente des FR sont très différentes, -15 Pa.m³.s et -1 Pa.m³.s. En sachant que le système JW2 a un plus grand L que JW1, on peut trouver que la pente de la caractéristique de l'étage ne dépend pas que du profil du FR seul. Il dépend aussi du facteur de la répartition de charge L .

La comparaison de ΔP_s au point de conception est effectuée au tableau 2. L'étage JW1 a des performances très satisfaisantes, tant en termes de valeur de pression atteinte que de rendement. Pour les étages JW1 et JW2, on peut noter des performances proches, avec un ΔP_s déterminé par les essais bien en accord avec la valeur de conception, avec moins de 7% d'écart. Pour JW3 et HSN, il y a un écart plus important jusqu'à -14% environ. Inversement, les différences entre FR1 et FR2 sont plus importantes, par rapport à celles de FR3 et FRH : le rotor amont FR2 est très peu performant et pourtant ne pénalise pas tant l'étage ; de manière réciproque, FR3 est un très bon rotor amont, mais JW3 est un piètre étage. Lorsque le facteur de répartition de charge est très bas (JW3), l'étage est le moins performant et de plus n'est pas nominal au débit de conception (voir la courbe des rendements en Fig. 2b). On peut formuler l'hypothèse que quand le L est plus bas, le RR est plus difficile à adapter avec le FR.

	ΔP_s (Pa)					
	FR			Etage		
	ΔP_s (Pa)	η_s (%)	écart prédiction	ΔP_s (Pa)	η_s (%)	écart conception
HSN	147±3	43.0±1	-2.6%	334±5	65.4±1	-10.5%
JW1	157±3	47.2±1	9.0%	364±5	66.8±1	-2.9%
JW2	101±2	38.3±1	5.2%	350±5	65.4±1	-6.2%
JW3	207±4	48.8±1	-1.4%	321±5	62.1±1	-13.9%

TABLE 2 – Comparaison des performances des quatre systèmes au débit de conception.

4.2 Effet du rapport de vitesse sur les performances des systèmes contra rotatifs

Les performances des quatre systèmes sont examinées en variant le rapport de vitesse θ . En raison de la puissance limitée des moteurs, on réalise les plus grandes valeurs de θ en diminuant la vitesse de l'ensemble. Nous avons vérifié que les élévations de pressions sous forme adimensionnelles ne dépendaient pas de la (faible) variation en nombre de Reynolds ainsi explorée.

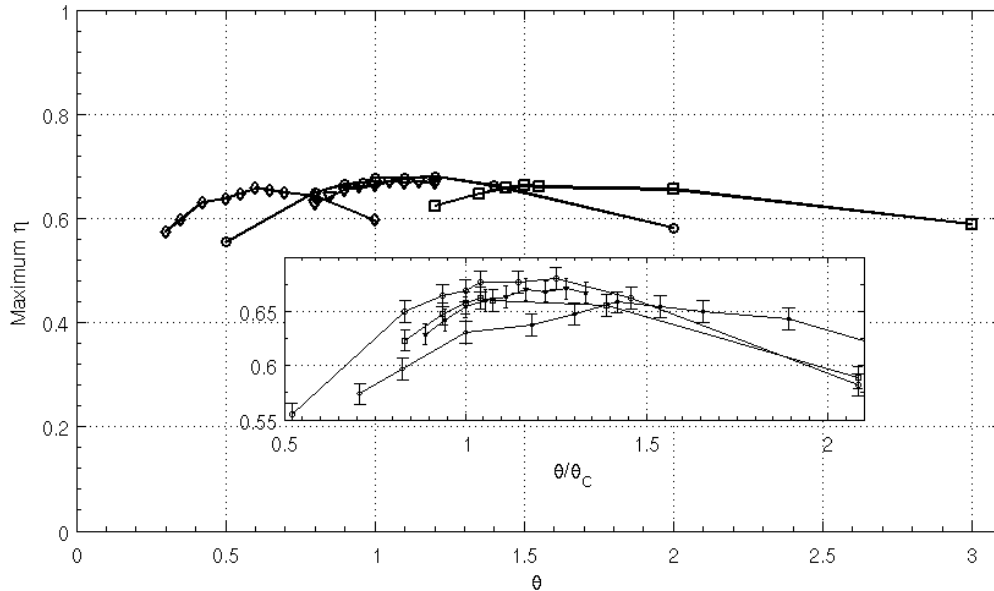


FIGURE 3 – rendement maximum varié avec rapport de vitesse pour : JW1 (○); JW2 (□); JW3 (◇); HSN (▽);

La figure 3 présente l'influence du θ sur les performances globales des quatre systèmes. Le rendement maximum est également tracé dans l'encart en fonction du θ normalisé par le θ_C de chaque système. Les rendements maximum des 4 systèmes sont réalisés à $\theta = 1.2$ et $\eta_{max} = 68.1\%$ (pour JW1), $\theta = 1.5$ et $\eta_{max} = 66.2\%$ (pour JW2), $\theta = 0.6$ et $\eta_{max} = 65.8\%$ (pour JW3) et $\theta = 1.05$ et $\eta_{max} = 67\%$ (pour HSN), spécifiquement 25%, 4.2%, 41.8% et 16.7% au dessus de la θ_C de chaque système. De plus, la Figure 3 montrent que les 4 systèmes peuvent d'atteindre une large plage de fonctionnement avec un rendement $\eta_s \leq 60\%$, en variant $0.85 \leq \theta/\theta_C \leq 2$ pour les quatre systèmes. Ceci semble donc constituer un caractère robuste d'un système de ventilateurs contra-rotatifs.

5 Conclusions

Trois nouveaux étages de ventilateurs contra-rotatifs ont été conçus, pour étudier l'influence de la répartition de charge. Les caractéristiques des étages ont été validées par des essais.

- Au point de conception, l'élévation de pression statique des trois systèmes sont légèrement inférieures à l'objectif de conception, respectivement de -3 , -6 et -14% pour JW1, JW2 et JW3.
- Pour les étages conçus avec quasiment la même répartition de travail entre rotor L ($\simeq 40\%$), la pente de la courbe ΔP_s de l'étage varie avec la même tendance que celle du FR seul.
- En revanche, pour les étages JW1 et JW2 qui ont des répartitions L différentes et des rotors amonts aux caractéristiques avec des pentes très différentes, les caractéristiques des étages sont finalement assez semblables : ces deux effets ont donc un rôle à jouer dans la forme des caractéristiques.

Par ailleurs, l'impact du rapport de vitesse de rotation a été analysé sur les caractéristiques globales. Les résultats sont :

- L'optimum des rendements est obtenu pour *les quatre étages* quand les rapports de vitesse sont au-dessus du rapport de conception.
- Les rendements statiques maxima sont restés supérieurs à 60% , en variant θ de 83% à 200% environ de ces valeurs de conception.

Ce dernier point mérite des éclaircissements. Une étude plus locale des champs de vitesse entre rotors est nécessaire.

Références

- [1] Cho, L., Choi, H., Lee, S., Cho, J. 2009 Numerical and experimental analyses for the aerodynamic design of high performance counter-rotating axial flow fans *In Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting - FEDSM2009, Colorado USA* pp. FEDSM2009-78507.
- [2] Min, K.-S., Chang, B.-J., Seo, H.-W. 2009 Study on the Contra-Rotating Propeller system design and full-scale performance prediction method *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* **1** 29-38
- [3] Nouri, H. 2012 Etude expérimentale de l'écoulement et de l'interaction entre deux rotors contra-rotatifs subsoniques *Thèse de doctorat, Arts et Métier Paristech, 2012*. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00795114>
- [4] Nouri, H., Danlos, A., Ravelet, F., Bakir, F., Sarraf, C. 2013 Experimental Study of the Instationary Flow Between Two Ducted Counter-Rotating Rotors *J. Eng. Gas Turbines Power* **135** 022601
- [5] Shigemitsu, T., Fukutomi, J., Okabe, Y. 2010 Performance and Flow Condition of Small-Sized Axial Fan and Adoption of Contra-Rotating Rotors *Journal of Thermal Science* **19** 1-6
- [6] Shigemitsu, T., Fukutomi, J., Agawa, T. 2013 Internal Flow Condition of High Power Contra-Rotating Small-Sized Axial Fan *International Journal of Fluid Machinery and Systems* **6** 25-32
- [7] Yoshihiko, A. 2003 Cooling System Technology That Changes The Conventional Trend *SANYO DENKI Technical report n° 16* <http://www.sanyodenki.co.jp/en/techrepo/16e/b.pdf>