

전기굴삭기 에너지 효율 향상을 위한 유압펌프-전동기 통합 제어 알고리즘[§]

이지호* · 이지혜* · 이형철** · 오창은***

* 한양대학교 전기공학과, ** 한양대학교 전기.생체공학부, *** 현대중공업

Integrated Control Algorithm of Hydraulic Pump with Electric Motor to Improve Energy Efficiency of Electric Excavator

Jeeho Lee*, Jihye Lee*, Hyeongcheol Lee**†, Chang Eun Oh***

* Dept. of Electric Engineering, Hanyang Univ.,

** Division of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang Univ.,

*** Construction Equipment Control Research Department, Hyundai Heavy Industries CO., Ltd,

(Received April 6, 2014 ; Revised August 19, 2014 ; Accepted September 16, 2014)

Key Words: Hydraulic Pump(유압펌프), Electric Motor(전동기), Electric Excavator(전기굴삭기), Efficiency Map(효율맵)

초록: 전기굴삭기는 배터리에 저장된 에너지로 전동기-유압펌프를 구동해서 유압 에너지를 생성하고 이를 작업에 활용한다. 기존 유압굴삭기의 유압펌프는 디젤 엔진의 운전 효율에 최적화된 레귤레이터에 의해 제어되고, 유압펌프 자체의 효율은 고려되지 않았다. 전기굴삭기는 배터리를 에너지원으로 사용하기 때문에 전동기의 효율뿐 아니라 유압펌프의 효율을 함께 고려한 제어가 요구된다. 통합 제어를 위해서 유압펌프와 전동기의 출력과 효율 특성을 분석하여 효율맵을 작성하였고, 이를 바탕으로 최적동작맵을 구성하고 통합 제어 알고리즘을 개발했다. 알고리즘의 효과를 확인하기 위해 전기굴삭기 MILS 를 구성해서 통합 제어 알고리즘을 적용했다. 굴삭기 작업 시뮬레이션 결과는 통합 제어 알고리즘이 시스템 효율을 향상 시켰음을 보여준다.

Abstract: An electric excavator consumes battery energy to drive an electric motor attached to a hydraulic pump to generate hydraulic power. In a conventional hydraulic excavator, the hydraulic pump is controlled by regulators, which are used to optimize the diesel engine efficiency. Because of a lack of battery energy capacity, an electric excavator controller should consider not only the electric motor efficiency but also the hydraulic pump efficiency. Thus, electric motor and hydraulic pump efficiency maps were constructed. An optimal operating map (OOM) was created based on the most efficient operating points under each input condition. An integrated control algorithm controlled the speed of the electric motor and displacement of the hydraulic pump according to the OOM. To confirm the utility of this algorithm, a model-in-the-loop simulator for the algorithm with an electric excavator was established. The simulation results showed that the integrated control algorithm improved the energy efficiency of an electric excavator.

- 기호설명 -

P : 동력(Power)

E : 에너지(Energy)

p : 압력(Pressure)

q : 배제용적(Displacement)

ω : 회전속도(Rotational speed)

T : 토크(Torque)

η : 효율(Efficiency)

I : 관성 모멘트(Inertia moment)

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 IT융합부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 서울대) 발표논문임

† Corresponding Author, hcleee@hanyang.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

하첨자

HP : 유압펌프(Hydraulic pump)

EM : 전동기(Electric motor)
 shaft : 회전축(Shaft)
 opt : 최적값(Optimal value)
 req : 요구값(Required value)

1. 서 론

1997 년 교토의정서가 채택된 이후 EU, 일본과 같은 선진국을 비롯한 수많은 국가에서 CO₂, CH₄ 와 같은 온실가스 배출량을 감축하기 위해 여러 산업 분야에서 규제법안을 수립 했다. 대표적으로 EU 에서는 이미 Euro5, 6 규제가 차량의 중량에 따라 차등 적용되고 있다. 온실가스 배출의 주범으로 일찍부터 지목 받아온 자동차 산업에서는 하이브리드 전기차^(1,2)를 비롯해서 클린디젤엔진⁽³⁾, 순수전기차⁽⁴⁾, 수소연료전지차⁽⁵⁾와 같은 대체 동력원을 사용한 차량이 개발되어 왔다.

건설장비 분야 역시 연료비용과 CO₂ 배출량을 저감하기 위해서 장비의 하이브리드화 연구가 수행되고 있다. 특히 굴삭기에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있는데, 하이브리드굴삭기의 시스템 구조와 그 제어에 대한 연구⁽⁶⁻⁹⁾ 하이브리드굴삭기의 동력 성능을 좌우하는 배터리 및 울트라커패시터 (혹은 슈퍼커패시터)로 구성된 에너지 저장 장치의 구성과 제어에 대한 연구^(10,11) 나아가서 대용량 배터리를 탑재한 플러그인 하이브리드굴삭기의 연구가 수행된 바 있다.⁽¹²⁾ 이들 연구는 연료 소모와 CO₂ 배출의 주요인인 엔진의 동작점을 전동기와 에너지 저장 장치의 제어를 통해 보완 하는 것을 주요 초점으로 맞추고 있기 때문에 유압 펌프의 효율에 대한 고려는 이루어지지 않고 있다.

전기굴삭기는 유압굴삭기나 하이브리드굴삭기의 에너지원인 경우에 비해서 극히 제한된 에너지용량을 지닌 배터리를 에너지원으로하고 있기 때문에 작업시간에 큰 제약을 가지고 있다. 따라서 작업시간을 연장하기 위해 유압펌프의 효율에 대한 고려가 요구된다.

본 연구에서는 전기굴삭기의 동력을 생산하는 유압펌프-전동기 시스템의 효율을 분석해서 최적의 효율을 가지는 최적동작맵을 도출하고, 동일한 작업을 수행 시 향상된 에너지 효율을 발휘하도록 제어알고리즘을 수립했다. 제어알고리즘의 효용성을 확인하기 위해 전기굴삭기 시뮬레이션 프로그램을 활용해 배터리 SOC (State of Charge) 추이, 에너지 소모량, 전동기의 동작점 변화를 분석하였다.

2. 유압펌프-전동기 시스템

유압펌프-전동기 시스템은 전기굴삭기 작업에

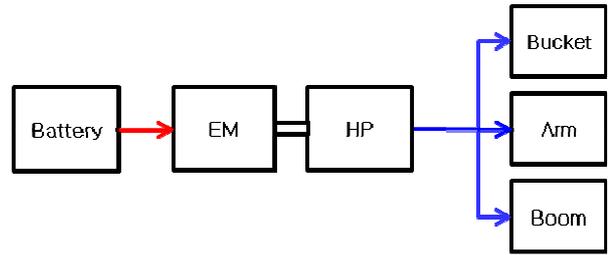


Fig. 1 Block diagram of hydraulic pump-electric motor system

필요한 동력을 공급하는 동력원이다. 전동기와 유압펌프의 축이 기계적으로 체결되어 있고 한정된 배터리를 사용하기 때문에 유압펌프와 전동기의 효율을 분석해 고효율 동작점 제어가 요구된다.

Fig. 1 에 유압펌프-전동기 시스템 구조를 나타내었다.

2.1 유압펌프

굴삭기에 널리 사용되는 유압펌프는 사판식 액시얼 피스톤 펌프로써 고압/대용량화에 유리하고 출력 밀도가 큰 장점을 지니고 있다.⁽¹³⁾ 유압펌프의 출력은 토출 압력과 토출 유량의 곱으로 결정되고, 토출 유량은 배제용적과 회전속도로 결정된다. 가변식 펌프의 경우 배제용적은 펌프에 부착된 레귤레이터에 의해 제어되는데, 운전자 조작에 의한 파일렛 압력과 펌프의 토출압력에 의해 결정된다.

전기굴삭기의 경우 에너지 효율을 향상 시키기 위해 EH (Electro-hydraulic) 펌프를 사용하게 되는데, EH 펌프는 사판의 각도를 전자레귤레이터로 제어함으로써 배제용적을 토출유량에 독립적으로 조절할 수 있다. 따라서 유압펌프의 출력은 다음 식 (1)과 같이 정해진다.

$$P_{HP} = p \cdot q \cdot \omega \tag{1}$$

유압펌프의 효율은 토출압력, 배제용적, 회전속도에 의해 결정되는데 강한 비선형성을 가지기 때문에 해석적 모델을 도출 하고 이를 제어 알고리즘에서 활용하기에는 어려움이 있다.⁽¹⁴⁾ 따라서 효율을 분석하기 위해서는 벤치실험 결과를 이용하는 것이 효과적이고, 본 연구에서는 유압펌프 제조사에서 데이터시트를 통해 발표한 효율맵을 활용했다. Fig. 2 와 Fig. 3 에 1500RPM, 1800RPM 에서의 유압펌프 효율맵을 나타내었다.⁽¹⁵⁾

2.2 전동기

전동기는 전기굴삭기에서 유압펌프에 동력을 공

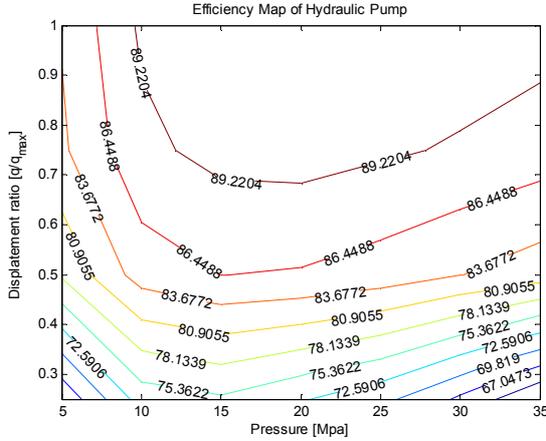


Fig. 2 Efficiency map of hydraulic pump at 1500RPM

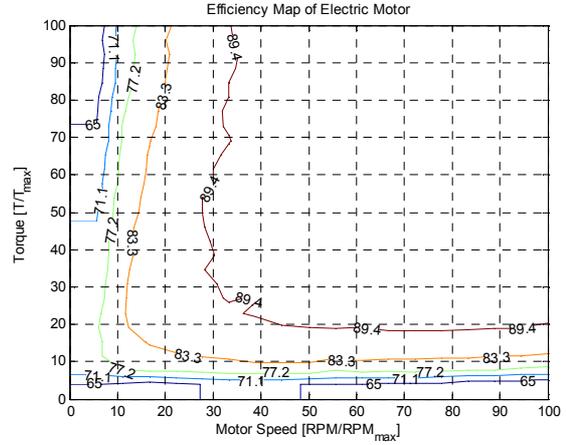


Fig. 4 Efficiency map of electric motor

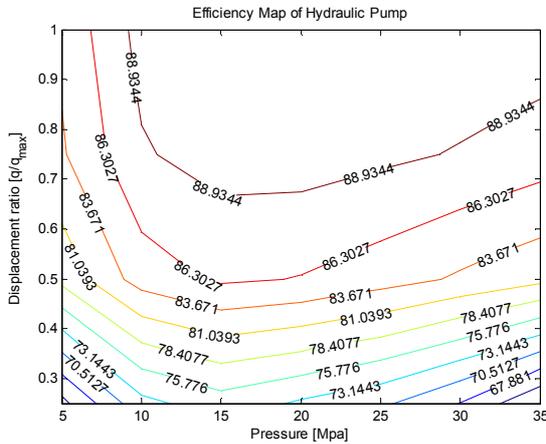


Fig. 3 Efficiency map of hydraulic pump at 1800RPM

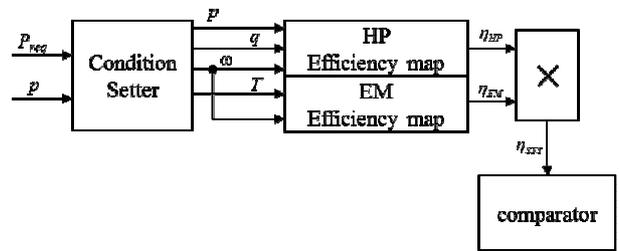


Fig. 5 Optimal operating map calculator

$$T \cdot \omega = \frac{P \cdot q \cdot \omega}{\eta_{HP}} \quad (4)$$

$$T = \frac{P \cdot q}{\eta_{HP}} \quad (5)$$

급하는 원동기의 역할을 수행한다. 시스템 효율 향상을 위해 출력 밀도가 높은 영구자석 동기 전동기를 적용한다. 전동기의 출력은 식 (2)와 같이 토크와 회전속도의 곱으로 정할 수 있다.

$$P_{EM} = T \cdot \omega \quad (2)$$

유압펌프-전동기 시스템은 동일 축 상에서 구동하기 때문에 두 기기의 회전속도는 동일하고 전동기의 출력은 식 (3)과 같이 일부 축의 회전운동량으로 전환되고 대부분 유압펌프의 동력으로서 공급된다.

$$P_{EM} = \frac{P_{HP}}{\eta_{HP}} + I_{shaft} \cdot \dot{\omega} \cdot \omega \quad (3)$$

여기서 회전축이 정상상태인 경우 $\dot{\omega} = 0$ 이므로 동역학적 항은 삭제 가능하다.

식 (1)과 (2), (3)으로부터 식 (4), (5)를 도출할 수 있다.

즉, 유압펌프-전동기 시스템이 정상상태에서 구동 중이면 전동기의 출력 토크는 유압펌프의 토출압력, 배제용적과 효율에 의해 결정된다. 여기서 유압펌프의 효율은 토출압력, 배제용적, 회전속도에 의해 결정되기 때문에 전동기 출력 토크 역시 이 세가지 조건에 의해 결정된다.

전동기의 효율은 전동기를 제어하는 인버터의 효율과 함께 계산되는데, 출력 토크와 회전 속도에 의해 결정된다. 전동기 효율은 강한 비선형성을 가지기 때문에 벤치실험을 통해 얻은 효율 데이터로부터 맵 형태로 정렬하여 제어에 활용한다. 본 연구에서는 해외 전동기 제작사에서 발표한 효율맵을 기반으로 Fig. 4 와 같은 전동기와 인버터의 통합 효율맵을 사용했다.

3. 제어 알고리즘

3.1 최적 동작맵 산출

전기굴삭기의 작업에 있어서 유압펌프의 출력은

작업자의 요구 동력에 상응하고, 토출 압력은 작업 부하에 따라 변하게 된다.

작업부하와 작업자의 요구 동력이 결정되면 유압펌프-전동기 시스템은 해당 조건을 만족하도록 구동해야 되는데, 이에 해당하는 동작점은 식 (1)에서 참고할 수 있는 바와 같이 배제용적과 회전 속도의 곱이 요구동력을 토출압력으로 나눈 값과 같다는 조건을 만족 시키면 된다. 같은 조건 하에 존재하는 수많은 동작점 중에서 가장 효율이 좋은 점을 찾기 위해 Fig. 5의 산출기를 활용했다.

산출기의 입력 조건인 요구동력과 토출압력이 결정되면 조건설정기에서는 배제용적을 임의로 설정하고 그에 부속되는 회전속도와 토크를 산출한다. 산출된 값들을 각각 유압펌프와 전동기 효율 맵에 입력하여 효율을 계산하고 두 효율을 곱하여 시스템 효율을 산출한다. 충분히 많은 수의 조건을 계산하여 각 경우의 효율을 비교기에서 서로 비교하여 가장 효율이 좋은 동작점을 저장한다. 그 결과 주어진 요구동력과 토출압력에서 가장 효율이 좋은 최적 동작점을 식 (6)과 같이 얻을 수 있다. 이 때 동작점의 배제용적 값을 저장하는데, 이는 주어진 조건에서 배제용적을 정하면 나머지 값은 식 (1)과 (2)로부터 결정할 수 있기 때문이다.

$$q_{opt} = f(P_{req}, p) \tag{6}$$

전기굴삭기 작업 환경에서 주어질 수 있는 모든 요구동력과 토출압력 조건을 입력하여 반복 산출해서 각 조건의 최적 동작점을 얻고 이를 입력조건에 대해 그리드의 형태로 정렬하여 최적동작맵 (Optimal Operating Map)을 얻었다. Fig 6.에 도출된 최적동작맵을 나타내었다.

3.2 통합 제어 알고리즘

통합제어 알고리즘은 Fig. 7에 나타나 있는 바와 같이 OOM과 지령값산출기(Command Calculator)로 이루어져 있다. OOM은 입력 조건인 요구동력과 토출압력으로부터 최적동작점의 배제용적을 출력한다. 지령값 산출기에서는 입력조건과 최적 배제용적배제부터 전동기 속도 지령값을 산출하고 최적 배제용적과 함께 출력한다. 배제용적과 속도 지령값은 식 (7), (8)과 같다.

$$q^* = q_{opt} \tag{7}$$

$$\omega^* = \frac{P_{req}}{p \cdot q_{opt}} \tag{8}$$

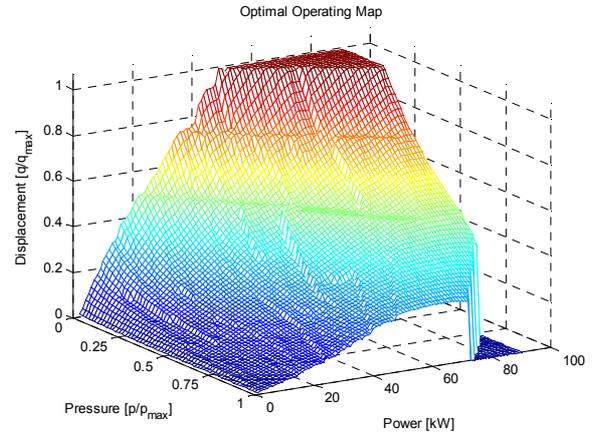


Fig. 6 Optimal operating map

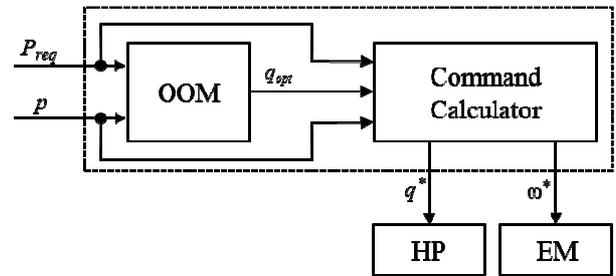


Fig. 7 Integrated control algorithm

4. 시뮬레이션 결과

4.1 MIL 시뮬레이션 환경

원강희 등⁽¹⁶⁾은 전기굴삭기의 동력 시스템 구성요소인 배터리, 전동기를 모델링하여 굴삭기 작업 실험 데이터를 활용해 에너지 소모 특성을 시뮬레이션할 수 있는 MILS(Model in the Loop Simulation) 환경을 구축했다.

개발된 통합제어알고리즘의 효과를 확인하기 위해서 기존 굴삭기의 작업 실험 결과 중 유압펌프의 출력으로서 요구되는 동력 결과를 추출하여 표준 작업 사이클을 수립하고, 이를 MILS에 입력하여 제어의 유무에 따른 시뮬레이션 결과를 비교했다. 표준 작업 사이클은 굴삭기 작업 중 건설현장에서 빈도가 높은 90도 상차, 레벨링, 아이들링을 조합해서 작성했으며 이를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 9과 10에는 시뮬레이션 환경과 입출력 관계를 간략히 나타내었다. 시뮬레이션을 통해 통합제어 알고리즘이 동작점의 변화를 통해 시스템 효율을 개선하여 배터리의 소모량, 에너지 소모량을 저감했음을 확인했다.

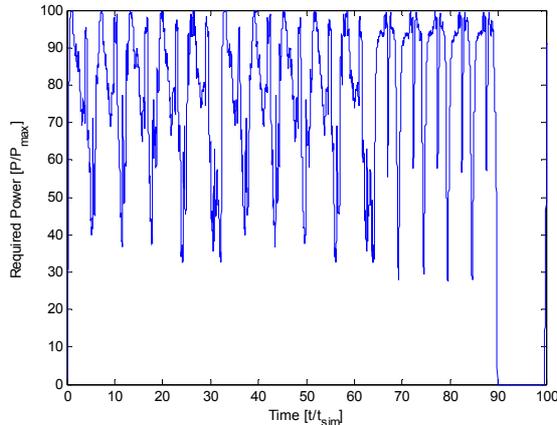


Fig. 8 Standard working profile

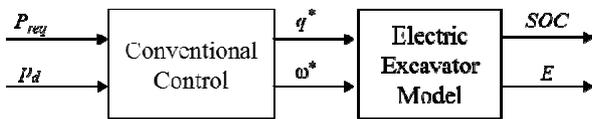


Fig. 9 Conventional control simulation

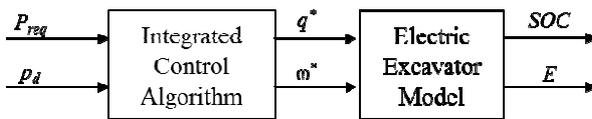


Fig. 10 Proposed control simulation

4.2 작업 시뮬레이션 결과

4.2.1 에너지 절감 효과

배터리 SOC 를 95%로 설정한 후 동일한 작업 시뮬레이션을 수행했다. Fig. 11 은 배터리 SOC 추이를 나타내고 있다. 기존의 제어 방법으로 작업하는 경우 93.31%까지 하락해서 총 용량의 1.69%를 소모했고, 통합제어알고리즘을 적용한 경우 93.39%까지 하락하여 총 용량의 1.61%를 소모했다. 제어알고리즘이 배터리 총용량의 0.08%를 절감했다.

Fig. 12 는 작업에서 소모한 에너지 추이를 나타내고 있다. 기존 제어 결과 소모된 에너지를 100으로 기준했을 때 통합제어알고리즘을 적용한 결과는 95.46 으로 나타나 4.54%의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있었다. Table 1 에 시뮬레이션 결과의 정량적 값을 정리했다.

4.2.2 동작점 이동

통합제어알고리즘 적용 결과 동작점이 이동했다. Fig. 13 에 기존 동작점을 나타내고 Fig. 14 에 변화된 동작점을 나타냈다.

Table 1 Comparison simulation results

Simulation	Final SOC(%)	Consumed Energy(%)	note
Conventional Control	93.31	100	-
Proposed control	93.39	95.46	4.54% Improved

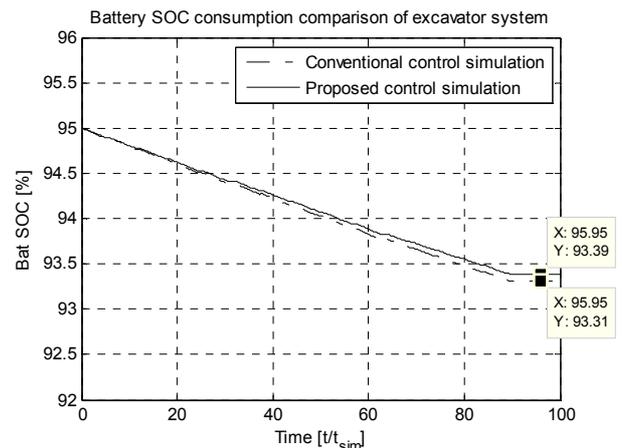


Fig. 11 Battery SOC history

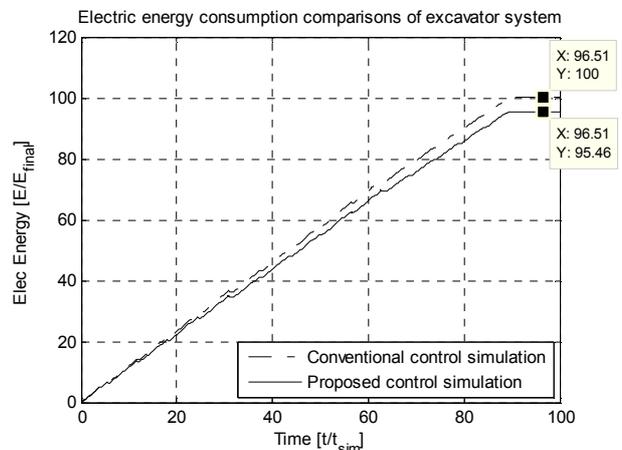


Fig. 12 Energy consumption

기존 동작점은 최대 속도의 70~80% 사이에 위치하면서 비교적 좁은 범위의 속도에서 요구되는 출력에 따라 토크가 증감되는 경향이 있다. 이는 기존 디젤 엔진의 SFC 맵의 고효율 영역과 일치한다. 제어 결과 동작점은 최대속도의 50~80% 사이에 넓게 분포하고 있으며 기존 동작점 대비 높은 영역까지 토크가 분포하고 있다.

유압펌프의 효율은 다른 조건이 고정된 경우, 배제용적이 최대일 때 최고 효율을 나타내므로, 같은 동력이 요구 되는 상황에서 높은 토크를 출력할 때 더 높은 시스템 효율을 나타낸다. 따라서

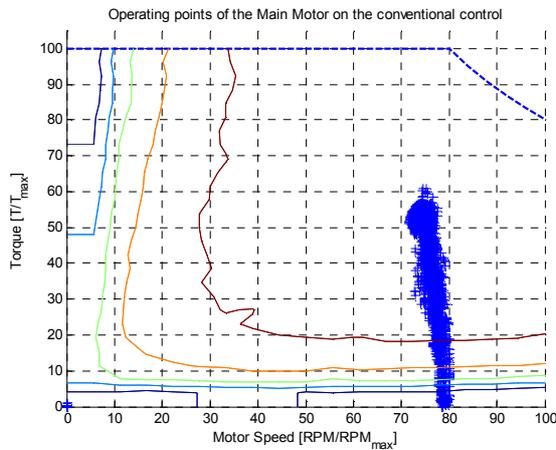


Fig. 13 Conventional operating point

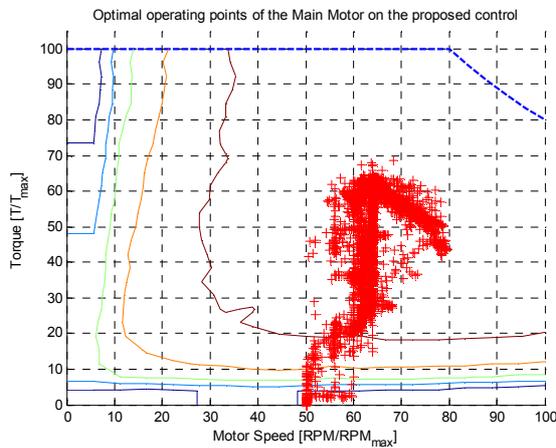


Fig. 14 Proposed control operating point

동작점들이 토크-속도 평면에서 곡선의 형태로 나타나는 등과워 곡선을 따라 고토크, 저속 영역으로 이동하는 경향을 나타내고 있다.

5. 결론

전기굴삭기의 주 동력원인 유압펌프-전동기 시스템의 효율을 분석하여 통합제어알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 유용성을 보였다.

유압펌프와 전동기의 효율을 분석하고, 작업자의 의도에 따라 결정되는 요구 출력과 부하에 의해 결정되는 압력을 입력 조건으로 하여 모든 조건에서 최적의 시스템 효율을 가지는 동작점을 탐색하여 이를 최적동작맵 (OOM)의 형태로 정리하고 이를 기반으로 통합제어 알고리즘을 수립했다.

통합제어알고리즘은 전기굴삭기가 같은 작업을 수행할 때 기존 제어 방법 대비 4.54%의 에너지를 절감하였고 이는 전기굴삭기의 최대 작업 시간을 연장할 수 있음을 의미한다. 유압펌프-전동기

시스템의 동작점은 유압펌프의 효율이 고려되어 같은 출력, 압력 조건에서 배제용적을 크게 해서 상대적으로 고토크, 저속 경향으로 이동 하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 “21 톤급 전기 굴삭기 개발 (10040173)” 과제의 지원으로 수행되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Salmasi, F. R., 2007, " Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles : Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends" *IEEE Trans. Veh. Technol*, Vol. 56, No. 5, pp. 2393~2404.
- (2) Chau, K. T., Wong, Y. S., 2002, "Overview of Power Management in Hybrid Electric Vehicles" *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, pp. 1953~1968.
- (3) Walsh, M. P., Branco, G. M., Ryan, J., Linke, R. R. A., Romano, J. and Martins, M. H. R. B., 2005, "Clean Diesels : The Key to Clean Air in Sao Paulo" *SAE paper 2005-01-2215*.
- (4) Bacher, C. and Hohenberg, G., 2011, "With Electricity to ZEV? Potential and Limitations of Electric Mobility," *SAE Int. J. Engines*, Vol. 4, No. 2, pp. 2608-2621.
- (5) Thounthong, P., Chunkag, V., Sethakul, P., Davat, B. and Hinaje, M., 2009, "Comparative Study of Fuel-Cell Vehicle Hybridization with Battery or Supercapacitor Storage Device," *IEEE Trans. Veh. Technol*, VOL. 58, NO. 8, pp. 3892~3904
- (6) Jin, K. C., Park, T. H., Lee, J. H., Jung, Y. S., Kwon, Y. M. and Lee H. C., 2009, "The Establishment of Model in the Loop Simulation Environment for the Development of HCU in Hybrid Excavators," *KSAE 2009 Annual Conference*, pp. 2953~2960
- (7) Lee, H. J., Sul, S. K., Kwak, S. Y. and Kim, S. I., 2010, "System Configuration and Control Strategy for Compound Type Hybrid Excavator with Ultra Capacitor," *International Power Electronics Conference*, pp. 820~826
- (8) Kwon, T. S., Lee, S. W., Sul, S. K., Park, C. G., Kim, N. I., Kang, B. I. and Hong, M. S., 2010, "Power Control Algorithm for Hybrid Excavator With Supercapacitor," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 46, No. 4, pp. 1447~1455
- (9) Tan, L., Liu, S. J., Huang, Z. H. and Zuo, J. Y., 2013, "Design and Simulation of Hybrid Excavator Loading System," *4th Int. Conference on Digital Manufacturing & Automation*, pp. 445~448
- (10) Wang, D., Pan, S., Lin, X., Guan, C., 2008, "Design of Energy Unit for Hybrid Excavator Power Management," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, DIO 10.1109/VPPEC.2008.4677481

- (11) Wang, H.M., Wang, Q. F., Hu, B. Z. and Feng, Q., 2013, "The Novel Hybrid Energy Storing Unit Design for Hybrid Excavator by the Effective Integration of Ultracapacitor and Battery," *IEEE/ASME Int. Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1585~1590
- (12) Lee, S. M., Lee, J. H., Lee, H. C. and Lee, S. H., 2013, "Modeling and Control of Plug-In Hybrid Excavator," *IEEE IECON2013*, pp. 4653 - 4659
- (13) Kim, S., Oh, S.H. and Jung, J.Y., 1998, "A Study on Characteristics of a Compensator System for Swash Plate Type Axial Piston Pump," *J. KSTLE*, Vol. 14, No. 4, pp. 15~22.
- (14) Jung, D.S., Kim, H.E., Jeong, H.S., Kang, B.S., Lee, Y.B., Kim, J.K. and Kan, E.S., 2005, "Experimental Study on The Performance Estimation Efficiency Model of a Hydraulic Axial Piston Motors," *Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power*, pp. 284~290.
- (15) Data Sheet for K3VG112, Kawasaki Precision Machinery.
- (16) Won, K. H., Lee, J. H., Oh, C. E. and Lee, H. C., 2012, "Modeling and Analysis of the Electric Drive System for Excavators," *KSAE 2012 Annual Conference*, pp. 2435~2441.