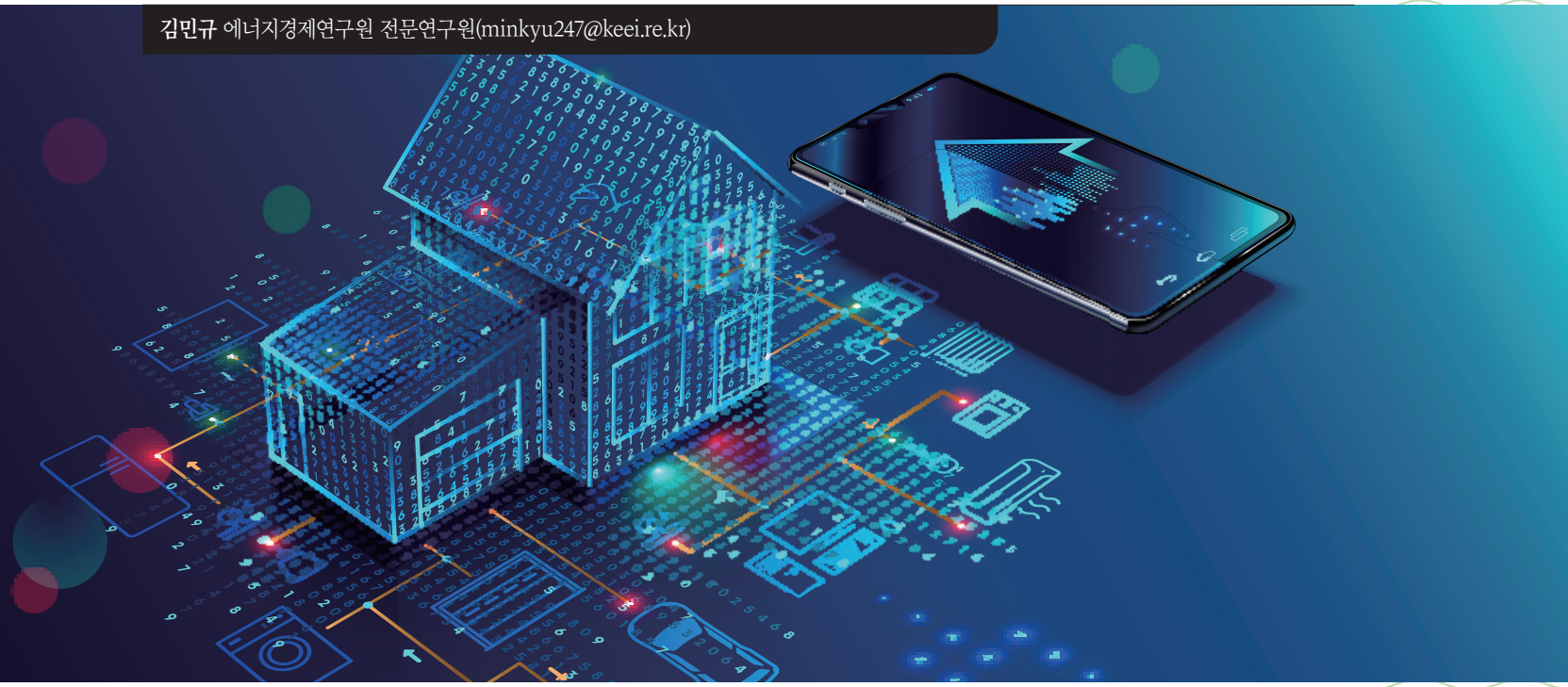
3

가정 부문 에너지 소비에 관한 최근 연구 트렌드 분석[1)]

김민규 에너지경제연구원 전문연구원(minkyu247@keei.re.kr)



1. 서론

전 세계 가정 부문 최종에너지 소비는 전체 최종에너지 소비 중 약 21%를 차지한다.[2) 3)] 급속한 발전과 소득 증가로 인해 가정 부문 에너지 수요는 계속 증가할 것이며 더 많은 온실가스 배출로 이어질 수 있을 것으로 추정된다.[4)] 가정 부문 에너지 수요를 관리하기 위한 사물인터넷(IoT)과 인공지능 기술의 등장, 청정에너지로의 전환에 따른 에너지 효율향상 정책 추진, 1인 가구의 증가에 따라 가정 부문 에너지 소비가 변화하고 있다. 연구자들은 정책적, 환경적, 그리고 기술적 변화에 대응하여 에너지 효율향상을 통한 가정 부

1) 본고는 「박기현(2021), 건물에너지 효율 향상을 위한 국제협력 방안 수립 연구, 에너지경제연구원」의 내용 중 일부를 수정 · 보완하여 요약한 것임.

2) 2019년 기준, OECD iLibrary, World energy balances 참조.

3) 우리나라의 경우 2020년을 기준으로 최종에너지 소비(222,563천toe) 중 가정 부문 에너지 소비(23,201천toe)가 차지하는 비중은 약 10.4%임(에너지경제연구원(2021), 에너지통계연보 2021, p.100. 참조).

4) Geng et al.(2017) 참조.

문 에너지 소비 절감, 새로운 기술을 통한 에너지 소비 예측 등 다양한 해결 방안을 찾기 위해 노력하고 있다. 추후 연구자들이 가정 부문 에너지 소비에 기여하기 위해서는 가정 부문 에너지 소비와 관련된 주요 이슈들이 무엇인지, 어떤 이슈가 증가하고 있고 어떤 이슈가 감소하고 있는지, 미래에 어떤 이슈가 주목을 받을 가능성이 높은지에 대한 종합적 분석이 필요하다. 이를 통해 연구자들은 가정 부문 에너지 소비와 관련하여 현재 필요한 연구가 무엇인지 알 수 있고, 정책 부문, 환경 부문, 그리고 기술 부문 등 부문별로 적합한 연구 주제를 탐색할 수 있다. 본고의 주요 연구 질문은 다음과 같다.

1. 가정 부문 에너지 소비와 관련하여 학술계가 주목하고 있는 연구 주제는 무엇인가?
2. 2011년부터 2020년까지 통계적으로 증가하거나 감소한 연구 주제는 무엇인가?
3. 다양한 연구 주제 중 아직 관심은 적지만, 미래에 주목받을 수 있는 연구 주제는 무엇인가?

본고는 Structural Topic Modeling (STM)을 사용하여 가정 부문 에너지 소비에 관한 학술적 이슈에 대한 이해 수준을 높이고, 시간에 따른 이슈의 변화를 통계적으로 검토한다. 특히 미래에 주목받을 수 있는 이슈들에 관해 탐구하여 연구자들의 연구 주제 발굴과 정책 입안자들의 가정 부문 에너지 정책 수립에 기여하고자 한다.

본고의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 본고의 분석 방법론 및 토픽 분석 결과를 간략히 설명한다. 3절에서는 본고의 방법론을 통해 도출한 주요 토픽에 관하여 논의한다. 4절에서는 결론 및 시사점을 다룬다.

2. 분석 방법론 및 결과

가. 분석 방법론

본고는 R의 'stm' 패키지를 활용하여 STM 기반의 토픽 분석을 수행했다. 분석을 위해 Sciencedirect.com에서 주거용 에너지 소비와 관련한 키워드를 검색하여 학술 논문들의 초록을 수집했다. 키워드는 'home energy consumption', 'residential energy consumption', 'household energy consumption', 그리고 'house energy consumption'으로 설정했으며, 기간은 2011년부터 2020년이다. 총 5,947개의 학술논문이 수집되었으며, 2,092개는 2011년부터 2015년, 3,855개는 2016년부터 2020년에 발표된 학술논문이다. 이를 기반으로 STM을 활용한 토픽 분석을 통해 2011~2015년과 비교하여 2016~2020년에 가정용 에너지 소비와 관련된 주제가 통계적으로 유의하게 변화되었는지 확인했다. 분석할 토픽의 수는 Held-out likelihood, Semantic Coherence, Residuals, Lower Bound 등 4개의 지표들을 기준으로 정했다. 본고는 토픽 수에 따른 지표별 증가율 및 감소율을 고려하여 총 100개의 토픽을 추출했다.

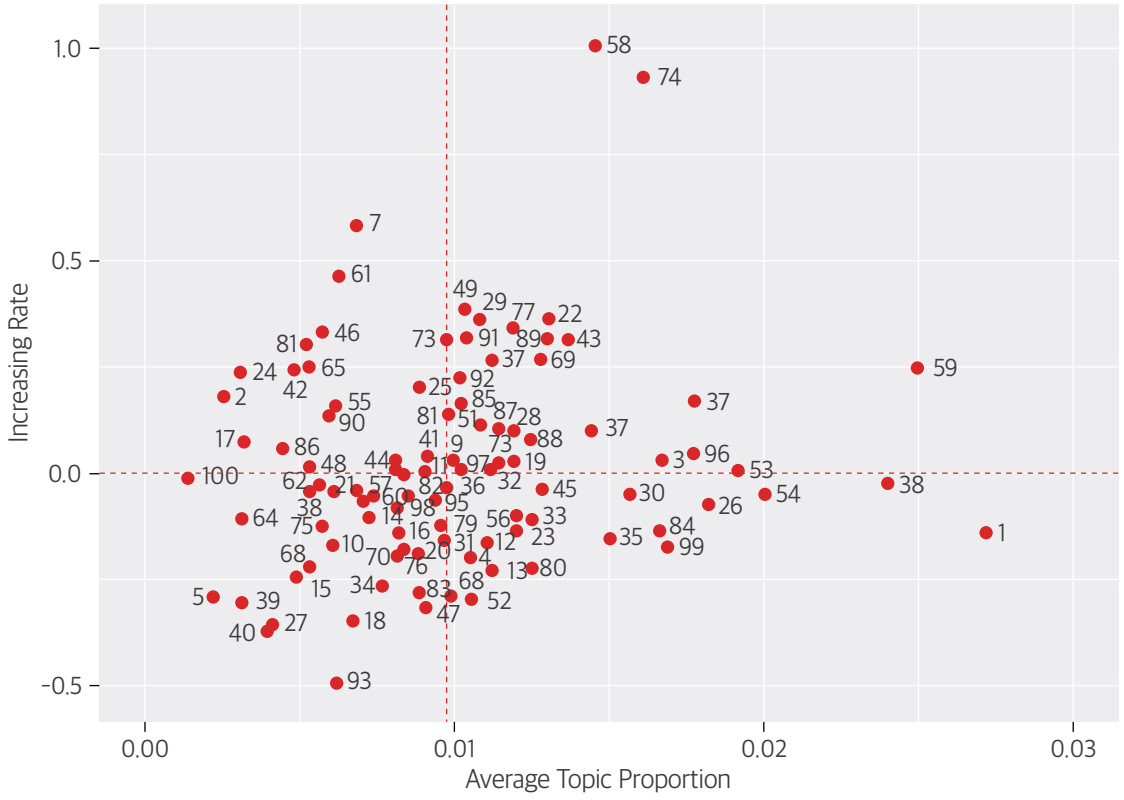
나. 분석 결과

아래 그림은 STM을 통해 추출한 총 100개의 토픽을 사분면에 배열한 것이다. 첫 번째 사분면은 Strong signals를 의미하고, 두 번째 사분면은 Weak signals를 의미한다.

Strong signals는 토픽 점유율이 전체 평균보다 높고, 2010년대 상반기와 비교해서 2010년대 하반기에 토픽 점유율이 증가한 연구 토픽들이며, 현재 활발하게 연구되고 있는 연구 토픽들을 의미한다.

Weak signals는 Ansoff(1975)에 의해 처음 소개되었으며[5] 토픽 점유율이 전체 평균보다 낮고, 2010년대 상반기와 비교해서 2010년대 하반기에 토픽 점유율이 증가한 연구 토픽들을 의미한다. 즉, 아직 관심은 적지만, 미래에 발전할 가능성을 가지고 있는 연구 토픽들을 의미한다. x축에 점선으로 그린 분할선은 전체 평균 토픽 점유율의 평균값을 의미한다. y축에 그린 점선은 0을 기준으로 한다. 만약 증가율이 0보다 크면 2010년대 상반기와 비교해서 2010년대 하반기에 토픽 점유율이 증가했다고 볼 수 있고, 0보다 작으면 토픽 점유율이 감소했다고 볼 수 있다([그림 1] 참조).

그림 1 STM을 통해 추출한 100개 주제의 사분면 배열



자료: 박기현(2021), 건물에너지 효율 향상을 위한 국제협력 방안 수립 연구, 에너지경제연구원, p.21.

5) Geng et al.(2017) 참조.

1) Strong Signals

총 100개의 토픽 중 31개가 Strong signals에 속했다. 그리고 8개의 토픽은 토픽점유율의 증가율에 관한 p-values가 유의 수준 0.05 이하로 나타났다. Strong signals에 선정된 토픽들 중 p-values가 유의수준 0.05 이하인 토픽들을 중점적으로 살펴보면 다음과 같다. 아래 <표 1>에 나와있는 것처럼, 토픽 22번은 비접촉식 개별 가전기기 부하 식별(non-intrusive load monitoring)을 통해 전력 사용 패턴을 분석하고, 이를 통해 부하 예측과 더불어 이상을 감지하는 것에 관해 논의하고 있다. 토픽 43번은 가정 부문 전력 소비 패턴 파악 및 클러스터링 방법을 통한 가정 부문 전력 소비 특징 분석에 관해 다루고 있다. 토픽 49번은 전기 자동차의 스마트 충전을 활용한 가정 부문 에너지 수요 관리를 다루고 있다. 토픽 58번은 가정용 마이크로그리드 시스템의 에너지 관리에 관한 연구들이 주를 차지하고 있다. 토픽 59번은 주거용 건물의 전력, 가스 등 에너지 소비 예측에 관해 다루고 있다. 토픽 74번은 주택용 태양광 발전 시스템의 경제성 및 수익성 분석에 관하여 논의하고 있다. 토픽 89번은 최적화를 통한 에너지 효율적인 주거용 건물 설계에 관해 다루고 있다. 마지막으로 토픽 91번은 홈 에너지 관리 시스템(HEMS)을 다루고 있다(<표 1> 참조).
Strong signals에 선정된 토픽들 중 p-values가 유의수준 0.05 초과, 0.1 이하인 토픽들은 다음과 같다. 토픽 29번은 스마트홈의 에너지 소비 관리에 관해 논의하고 있다. 토픽 69번은 가정 부문 에너지 절약 행동에 관한 연구가 주를 차지하고 있다. 토픽 77번은 스마트미터 데이터를 활용한 가정 부문 에너지 소비 분석에 관해 논의하고 있다.

표 1 Strong signals로 선정된 토픽 관련 문헌

토픽	키워드	저자 (연도)	제목
22	applianc, consumpt, load, propos, approach, monitor, data, algorithm, disaggreg, detect, ...	Houidi et al. (2020)	Multivariate event detection methods for non-intrusive load monitoring in smart homes and residential buildings
		Rashid et al. (2019)	Can non-intrusive load monitoring be used for identifying an appliance's anomalous behaviour?
		Dinesh et al. (2017)	Non-intrusive load monitoring under residential solar power influx
29	network, iot, devic, data, node, applic, wireless, communic, propos, monitor, ...	Iqbal et al. (2018)	A generic internet of things architecture for controlling electrical energy consumption in smart homes
		Collotta and Pau (2015)	Bluetooth for Internet of Things: A fuzzy approach to improve power management in smart homes
		Geraldo Filho et al. (2019)	Energy-efficient smart home systems: Infrastructure and decision-making process
43	data, consumpt, statist, pattern, cluster, sampl, analysi, group, collect, spatial, ...	Zhou et al. (2017)	Household monthly electricity consumption pattern mining: A fuzzy clustering-based model and a case study
		Filippín et al. (2013)	Evaluation of heating energy consumption patterns in the residential building sector using stepwise selection and multivariate analysis
		Mamchych and Wallin (2014)	Looking for Patterns in Residential Electricity Consumption
49	grid, storag, charg, distribut, batteri, generat, load, oper, vehicl, voltag, ...	Khemakhem et al. (2020)	A collaborative energy management among plug-in electric vehicle, smart homes and neighbors' interaction for residential power load profile smoothing
		Mesarić and Krajcar (2015)	Home demand side management integrated with electric vehicles and renewable energy sources
		Golshannavaz (2018)	Cooperation of electric vehicle and energy storage in reactive power compensation: An optimal home energy management system considering PV presence
58	propos, flexibl, schedul, manag, program, problem, model, microgrid, consid, distribut, ...	Zakariazadeh et al. (2014)	Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization
		Morsali et al. (2020)	A relaxed constrained decentralised demand side management system of a community-based residential microgrid with realistic appliance models
		Da Silva et al. (2020)	A preference-based demand response mechanism for energy management in a microgrid
59	model, predict, simul, forecast, data, develop, approach, valid, consumpt, paramet, ...	Liu et al. (2020)	A hybrid prediction model for residential electricity consumption using holt-winters and extreme learning machine
		Potočnik et al. (2019)	A comparison of models for forecasting the residential natural gas demand of an urban area
		Dong et al. (2016)	A hybrid model approach for forecasting future residential electricity consumption

토픽	키워드	저자 (연도)	제목
69	behavior, consum, adopt, energy-sav, prefer, environment, awar, polici, resid, attitud, …	Spandagos et al. (2020)	"Triple Target" policy framework to influence household energy behavior: Satisfy, strengthen, include
		Zhang et al. (2018)	Impact factors of household energy-saving behavior: An empirical study of Shandong Province in China
		Zhang et al. (2020)	Willingness to pay a price premium for energy-saving appliances: Role of perceived value and energy efficiency labeling
74	self-consumpt, storag, photovolta, batteri, econom, profit, invest, increas, instal, residenti, …	Ellabban and Alassi (2019)	Integrated Economic Adoption Model for residential grid-connected photovoltaic systems: An Australian case study
		Rodrigues et al. (2017)	Economic analysis of photovoltaic systems for the residential market under China's new regulation
		Cristea et al. (2020)	Economic assessment of grid-connected residential solar photovoltaic systems introduced under Romania's new regulation
77	smart, meter, data, custom, grid, util, manag, inform, enabl, consumpt, …	Yildiz et al. (2017)	Recent advances in the analysis of residential electricity consumption and applications of smart meter data
		Zhou et al. (2017)	Discovering residential electricity consumption patterns through smart-meter data mining: A case study from China
		Oh et al. (2020)	Analysis methods for characterizing energy saving opportunities from home automation devices using smart meter data
89	optim, minim, solut, object, algorithm, propos, function, consid, combin, obtain, …	Fesanghary et al. (2012)	Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm
		Sghiouri et al. (2018)	Shading devices optimization to enhance thermal comfort and energy performance of a residential building in Morocco
		Hamdy et al. (2011)	Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings
91	control, strategi, manag, oper, algorithm, hem, propos, reduc, intellig, develop, …	Kim et al. (2012)	Implementing home energy management system with UPnP and mobile applications
		Shakeri et al. (2018)	Implementation of a novel home energy management system (HEMS) architecture with solar photovoltaic system as supplementary source
		Shakeri et al. (2017)	An intelligent system architecture in home energy management systems (HEMS) for efficient demand response in smart grid

주: p-values가 0.1 이하인 토픽만 나열했음.

자료: 박기현(2021), 건물에너지 효율 향상을 위한 국제협력 방안 수립 연구, 에너지경제연구원, pp.27-29.

2) Weak Signals

Weak signals에는 100개 토픽 중 총 18개가 할당되었다. 그리고 2010년대 전반 대비 후반에 토픽점유율 증가율의 p-values가 유의수준 0.05 이하인 토픽은 1개이며, 토픽 7번이다. 토픽 7번은 아래 <표 2>에 나와있는 것처럼 가정 부문 석탄 에너지 소비에 관하여 논의하고 있다(<표 2> 참조).

Weak signals에 선정된 토픽들 중 p-values가 유의수준 0.05 초과, 0.1 이하인 토픽들은 다음과 같다. 토픽 61번은 에너지 빈곤에 관한 연구가 다수이다. 토픽 73번은 주거용 건물의 열 쾌적성 예측 및 향상에 관하여 논의하고 있다. 마지막으로 토픽 81번은 주거용 건물의 에너지 성능 평가에 관하여 다루고 있다.

표 2 Weak signals로 선정된 토픽 관련 문헌

토픽	키워드	저자 (연도)	제목
7	pollut, coal, artificialintellig, emiss, sourc, combust, china, burn, control, industri, ...	Pyka and Wierzchowski (2016)	Estimated mercury emissions from coal combustion in the household sector in Poland
		Peng et al. (2019)	Underreported coal in statistics: A survey-based solid fuel consumption and emission inventory for the rural residential sector in China
		Kerimray et al. (2017)	Coal use for residential heating: Patterns, health implications and lessons learned
61	poverti, fuel, countri, vulner, access, inequ, women, poor, polici, bangladesh, ...	Middlemiss and Gillard (2015)	Fuel poverty from the bottom-up: Characterising household energy vulnerability through the lived experience of the fuel poor
		Belaïd (2018)	Exposure and risk to fuel poverty in France: Examining the extent of the fuel precariousness and its salient determinants
		Karpinska and Śmiech (2020)	Invisible energy poverty? Analysing housing costs in Central and Eastern Europe
73	thermal, comfort, hvac, indoor, condit, environ, improv, adapt, occup, maintain, ...	Chai et al. (2020)	Using machine learning algorithms to predict occupants' thermal comfort in naturally ventilated residential buildings
		Attia and Carlucci (2015)	Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate
		Sghiouri et al. (2018)	Shading devices optimization to enhance thermal comfort and energy performance of a residential building in Morocco
81	rate, degre, differ, three, consumpt, total, help, limit, comparison, threshold, ...	Fernandes et al. (2020)	The contribution of ventilation on the energy performance of small residential buildings in the Mediterranean region
		Guillén-Mena and Quesada (2019)	Assessment model of energy performance in housing of Cuenca, Ecuador
		Cozza et al. (2020)	Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland

주: p-values가 0.1 이하인 토픽만 나열했음.

자료: 박기현(2021), 건물에너지 효율 향상을 위한 국제협력 방안 수립 연구, 에너지경제연구원, p.33.

3. 주요 토픽 논의

가. Strong Signals

1) 토픽 58 - 마이크로그리드 시스템의 에너지 관리

[그림 1]에 나와있는 것처럼, Strong signals 중에서 토픽 58번은 증가율이 가장 높으며, 토픽 점유율도 상대적으로 높은 토픽으로서 가장 주목할만하다([그림 1] 참조). 토픽 58번에는 마이크로그리드 시스템의 에너지 관리에 관한 연구가 많았다. 연구 주제로는 수요반응 프로그램의 도입을 고려하는 마이크로그리드에 대한 에너지 스케줄링 방법 제안[6], 가정용 마이크로그리드 시스템에 대한 에너지 관리 전략 제안[7], 마이크로그리드의 에너지 관리를 위해 실시간 전력 가격에 기반한 DR 최적화 모델 제안[8]이 있다. 마이크로그리드는 경제 및 환경 등 다양한 측면에서 이익을 얻을 수 있기 때문에 현재의 중앙 집중식 에너지 발전 시스템의 대안으로 간주되고 있다.[9]

마이크로그리드는 개인이 전력을 생산하여 저장할 수 있기 때문에 에너지 저장 시스템의 가용성과 간헐성에 대한 연구 또한 활발해질 것이라고 예상할 수 있다. 또한 국가단위가 아니라 지역단위에서도 스마트그리드 활용에 참여하는 움직임이 늘어나고 있으며, 스마트그리드 기술에 바탕을 둔 가상 발전소(VPP)는 다양한 분산자원을 통합하여 관리한다는 점에서 마이크로그리드와 함께 앞으로 연구가 활발해질 것으로 예상할 수 있다.

토픽 58번은 가정용 마이크로그리드 시스템의 에너지 관리 외에도 스마트홈의 에너지 최적화[10]와 스마트홈의 에너지 관리[11]에 관한 연구를 포함하고 있다. 최근 에너지 분야에서 ICT 보급이 확대됨에 따라 스마트홈 연구에 대한 노력이 더욱 강조되고 있음을 알 수 있다.

2) 토픽 74 - 주택용 태양광 발전 시스템의 경제성 및 수익성 분석

토픽 74번은 증가율이 두 번째로 높으며, 상대적으로 높은 토픽 점유율을 차지하고 있는 토픽으로서, 주택용 태양광 발전 시스템의 경제성 및 수익성 분석에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 주요 연구 주제로는 주택용 태양광 발전 시스템의 경제성 분석[12], 가정의 자가 소비형 태양광 발전 시스템의 수익성 평가[13]가 있다. 주택용 태양광 발전은 비용을 절감하고 다양한 용도로 쓸 수 있다는 점에서 주택에서의 활용이 증가하고 있다. 이에 따라 주택용 태양광 발전 시스템의 경제성 및 수익성 분석에 관한 연구가 활발히 진행되고

---

6) Zakariazadeh et al.(2015) 참조.

7) Morsali et al.(2020) 참조.

8) da Silva et al.(2020) 참조.

9) Zhang et al.(2015) 참조.

10) Paudyal and Ni(2019); De Oliveira et al.(2011); Essiet et al.(2019) 참조.

11) Fernandes et al.(2014); Khalid et al.(2019) 참조.

12) Ellabban and Alassi(2019); Rodrigues et al.(2017); Cristea et al.(2020) 참조.

13) Escobar et al.(2020) 참조.

있다. 또한 설비 설치를 위한 초기 투자 비용, 태양광 발전을 통한 에너지 공급과 가정에서의 수요 사이의 불일치 등은 주택용 태양광 발전 시스템 보급 확산을 위해 해결해야할 장애물로서, 이에 대한 연구도 앞으로 활발히 진행될 것임을 예상할 수 있다.

토픽 74번은 주택용 태양광 발전 시스템에 관한 연구 외에도 주택용 배터리에 관하여 다루었다. 주택용 배터리에 관한 주요 연구로는 주택용 배터리의 수익성 개선을 위한 태양광 발전 최적화[14], 분산형 주택용 배터리의 이점 평가[15], 에너지 저장 애플리케이션과의 결합을 통한 주택용 배터리 기술의 경제성 향상[16]이 있다.

3) 토픽 22 - 비접촉식 개별 가전기기 부하 식별(NILM)

토픽 22번은 토픽 점유율이 상대적으로 높고, 통계적으로 유의미한 토픽으로서, 비접촉식 개별 가전기기 부하 식별(Nonintrusive load monitoring, NILM)에 관한 연구가 많았다. 연구 주제로는 NILM을 활용하여 가정에서 쓰는 가전기기의 작동일정 파악[17], 가전기기의 고장 또는 이상 감지[18], 개별 부하 감지[19] 주택용 태양열 발전시설이 설치된 주택의 태양열 유입량과 가전기기의 전력 소비 수준 파악[20], 가정용 에어컨과 냉장고의 전력 소비량 측정[21]이 있다. NILM은 가정으로 공급되는 전력의 패턴을 분석하여 가정에서 사용하는 가전제품과 제품별 에너지 소비량을 예측하는 기술이다.[22] 이 기술을 통해 집에서 쓰는 여러 가지 가전기구의 전력 사용량 모니터링을 통해 가전기구들이 정상적으로 작동하고 있는지 확인 가능하다. 에너지 부문에서 IoT 기술의 확산에 따라 NILM을 활용하여 가정 내 에너지 소비 이력과 패턴을 분석하고, 이것을 학습하여 효율적으로 에너지를 관리하는 기술 개발에 대한 요구가 증가하고 있다. 이에 맞춰 NILM의 기술 향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 앞으로 소비 이력 및 패턴 분석의 정확도 향상, NILM을 통한 개인 맞춤형 서비스 제공 등에 대한 연구도 활발히 진행될 것임을 예상할 수 있다.

토픽 22번에는 NILM 외에도 에너지 분할 측정(Energy Disaggregation)을 통해 각 가전제품들의 개별 전력 사용량에 관한 데이터를 추출하는 것에 관한 연구도 포함되었다.[23] 본 연구와 유사한 연구로서 에너지 디지털화 부문에 관해 분석한 연구가 있다. Park et al.(2021)은 2016년부터 2018년까지의 학술 논문을 분석했고, 이 연구에서 분할 측정은 본 연구와 마찬가지로 가정부문의 전력 사용을 세분화 시키는 것을 지칭했다.[24] 흥미롭게도, 이 연구에서 분할 측정은 Weak signals에 속하는 것으로 나타났는데, 비교적

14) Pena-Bello et al.(2017) 참조.
15) Jankowiak et al.(2020) 참조.
16) Parra and Patel(2019) 참조.
17) Houidi et al.(2020) 참조.
18) Rashid et al.(2019) 참조.
19) Figueiredo et al.(2012) 참조.
20) Dinesh et al.(2017) 참조.
21) Biansoongnern and Plungklang(2016) 참조.
22) Giri and Bergés(2015); Chae and Park(2017) 참조.
23) Aiad and Lee(2018); Breschi et al.(2018); Matsui et al.(2015) 참조.
24) Park et al.(2021) 참조.

최신 데이터를 활용한 본 연구에서는 분할 측정이 Strong signals에 속하는 것으로 나타났다. 이를 통해 현재 분할 측정에 관한 토픽이 Weak signals에서 Strong signals로 확장되고 있다는 것을 알 수 있다.

4) 기타 토픽[25)]

Strong signals에 선정된 토픽들 중 p-values가 유의수준 0.05 이상, 0.1 이하인 토픽에는 각각 스마트 홈의 에너지 소비 관리(토픽 29번), 전기 자동차의 스마트 충전을 활용한 가정 부문 에너지 수요 관리(토픽 49번), 가정 부문 에너지 절약 행동(토픽 69번), 스마트미터 데이터를 활용한 가정 부문 에너지 소비 분석(토픽 77번), HEMS(토픽 91번)에 관한 연구가 포함되었다. 추후 전기자동차의 수는 증가할 것이며, 전기자동차의 배터리가 에너지 저장 시스템으로 간주되고, 스마트 충전을 위한 에너지원으로서의 역할을 할 것이다. 이에 따라 전기자동차의 스마트 충전에 관한 연구가 큰 관심을 받고 있다. 또한 가전제품에 부착하는 에너지 효율 라벨, 에너지 절약형 가전제품에 대한 프리미엄 가격 지불 의향, 에너지 효율적인 가전제품에 대한 리베이트 프로그램 등 가정에서의 에너지 절약 행동에 관한 연구도 많이 진행되고 있다.

5) Strong Signals 요약

요약하자면 Strong signals에서는 재생에너지 활용에 따라 마이크로그리드 시스템의 에너지관리, 주택용 태양광 발전 시스템의 경제성 및 수익성 분석, 주택용 배터리에 관한 연구가 관심을 받고 있다. 그리고 에너지 부문의 ICT 도입 확산에 따라 스마트 홈의 에너지 최적화에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 또한 NILM, 에너지 분할 측정과 같은 에너지 측정과 예측에 관한 연구도 Strong Signals로 선정되었다.

나. Weak Signals

1) 토픽 7 - 가정 부문 석탄 에너지 소비

[그림 1]에 나와있는 것처럼, Weak signals 중에서는 토픽 7번이 증가율이 가장 높았다([그림 1] 참조). 토픽 7번에는 가정 부문 석탄 에너지 소비에 관한 연구가 주를 차지하고 있다. 청정에너지로의 전환을 위해 석탄의 수요관리에 관한 관심이 커지면서 석탄 에너지 관련 이슈는 빠르게 증가하고 있다. 주요 연구 주제로는 가정에서의 석탄 연소로 인한 수은 배출량 추정[26)], 농촌 주택 부문의 석탄 소비와 오염 물질 배출량 사이의 관계[27)], 주거용 난방을 위한 석탄 소비 패턴 검토[28)], 도시와 농촌의 주거용 석탄 소비 격차 분석[29)]이 있다.

---

25) 기타 토픽 파트에는 p-values가 유의수준 0.05 이상, 0.1 이하인 토픽을 정리함.

26) Pyka and Wierzchowski(2016) 참조.

27) Peng et al.(2019) 참조.

28) Kerimray et al.(2017) 참조.

29) Chen et al.(2018) 참조.

주요 선진국들이 탄소중립 달성을 목표로 에너지전환 정책을 발표하고 있다. 또한 주택 형태 및 난방 방식의 변화 등 주택의 현대화, 청정연료 선호, 국민소득 증가로 인해 향후 석탄 수요는 감소할 것임을 예상할 수 있다. 향후 석탄 에너지 수요 및 공급 예측 등 에너지 수요관리 부문의 연구와 더불어 청정연료로의 교체를 위한 지원 정책에 관한 연구가 관심을 받을 것이다.

토픽 7번은 가정 부문 석탄 에너지 소비에 관한 연구 이외에도 주거용 에너지 소비가 대기오염 물질 배출에 미치는 영향[30]에 관해 다루었다. 주요 선진국들이 온실가스 감축목표를 발표하고, 감축 목표를 상향하고 있는 가운데, 대기오염 물질 배출에 관한 주제는 앞으로 계속 관심을 받을 것이다.

토픽 7번은 가정 부문 석탄 에너지 소비에 관한 연구 및 주거용 에너지 소비가 대기오염 물질 배출에 미치는 영향에 관한 연구 외에도 주택에서의 에너지 사용과 실내 공기질 사이의 관계[31], 농촌주택 난방 연료의 종류가 실내 공기질에 미치는 영향[32]에 관하여 다루었다.

30) Chen et al.(2016); Yang et al.(2018) 참조.

31) Fazli and Stephens(2018) 참조.

32) Zhang et al.(2015) 참조.

2) 토픽 61 - 에너지 빈곤

토픽 61번도 다른 토픽과 비교해서 높은 증가율을 보였다. 토픽 61번에는 에너지 빈곤에 대한 연구가 많았다. 주요 주제로는 연료빈곤층의 에너지 취약성 해결을 위한 과제 파악[33], 연료 빈곤 가구의 주요 특징 조사[34], 에너지 빈곤을 추정할 수 있는 지표 및 방법 제안[35], 가정의 에너지 빈곤의 사회경제적 결정요인 파악[36]이 있다. 사회, 경제적인 발전에도 불구하고 에너지 접근에 어려움을 겪고 있는 국가들이 존재한다. 적정 수준의 에너지 비용을 지출할 수 있는 경제적 여건이 안되는 가구들이 있으며, 에너지 빈곤 가구의 수를 줄이려는 노력이 계속되고 있다. 시대의 변화에 따른 에너지 빈곤층의 새로운 기준, 지표 등에 관한 연구와 에너지 빈곤층을 위한 다양한 에너지 복지 정책에 관한 연구가 관심을 받을 것이다.

3) 토픽 73 - 주거용 건물의 열 쾌적성 예측 및 향상

토픽 73번도 상대적으로 높은 증가율을 보였다. 토픽 73번은 주거용 건물의 열 쾌적성 예측 및 향상에 관하여 논의하고 있다. 주요 주제로는 자연 환기가 가능한 주거용 건물에서 주거자의 열 쾌적성 예측[37], 다양한 열 쾌적성 모델이 제로에너지 주거용 건물의 에너지 소비와 열 쾌적성에 미치는 영향[38], 주거용 건물의 열 쾌적성과 에너지 성능 향상을 위한 차양 장치 최적화[39], 현대식 고층 주거용 건물의 열 쾌적성 관리[40], 냉방시스템 업그레이드가 저소득층 주택의 열 쾌적성에 미치는 영향[41]이 있다. 열 쾌적성은 건물 부문의 에너지 연구에서 많은 관심을 받고 있는 주제다. 가정 부문 에너지 분야에서는 열 쾌적성 향상을 위한 패시브하우스가 앞으로 관심받을 수 있는 토픽이다. 건물 내에서 발생하는 열을 이용하여 난방하는 패시브하우스는 에너지 소비를 절감할 수 있고 이산화탄소 배출을 줄일 수 있다. 패시브하우스의 단열재 및 창호의 성능 강화, 차양 효과, 환기 장치에 관한 연구는 앞으로 주목받을 것으로 예상된다.

4) 토픽 81 - 주거용 건물의 에너지 성능 평가

Weak signals에서 마지막으로 자세히 알아볼 토픽은 81번이다. 토픽 81번은 주거용 건물의 에너지 성능 평가에 관하여 다루고 있다. 주요 주제로는 환기 전략이 소형 주거용 건물의 에너지 성능에 미치는 영향[42],

33) Middlemiss and Gillard(2015) 참조.
34) Belaïd(2018) 참조.
35) Karpinska and Śmiech(2020); Betto et al.(2020); Lin and Wang(2020) 참조.
36) Sharma et al.(2019) 참조.
37) Chai et al.(2020) 참조.
38) Attia and Carlucci(2015) 참조.
39) Sghiouri et al.(2018) 참조.
40) Stopps and Touchie(2020) 참조.
41) Mudge and Saman(2017) 참조.
42) Fernandes et al.(2020) 참조.

주택의 에너지 성능 평가 모델 제안[43], 주거용 건물의 열 에너지 성능 격차 측정[44]이 있다. 주요 선진국들은 자체적인 기준을 만들어 건물의 에너지 성능을 평가하고 인증하고 있다. 주거용 건물의 에너지 성능을 정확하게 파악하여 평가하는 것은 주거용 에너지 효율향상을 이끌 수 있다. 앞으로 청정에너지로의 전환과 노후 주택의 리모델링에 대한 관심은 물론이고, 이에 따른 주거용 에너지 성능 평가 기준 개정과 주택 에너지 성능 인증제도 개발에 대한 연구는 앞으로 주목받을 수 있는 연구 주제 중 하나이다.

5) Weak Signals 요약

요약하자면, Weak signals에서는 석탄 에너지 소비와 주거용 에너지 소비가 대기오염 물질 배출에 미치는 영향에 관한 논의들이 상대적으로 높은 증가율을 보였다. 다음으로 주택에서의 에너지 사용과 실내 공기질 사이의 관계에 대한 관심도 증가율이 높게 나타났다. 또한 에너지 빈곤 문제도 부각되었으며, 주거용 건물의 열 쾌적성 예측 및 향상과 에너지 성능 평가에 관한 논의가 Weak signal로 선정되었다.

4. 결론 및 시사점

본 연구를 통해 가정 부문 에너지 소비에 관한 학술적 이슈의 변화를 통계적으로 검토했으며, 어떤 주제가 가장 관심을 받고 있는지, 어떤 주제가 아직 관심은 적지만 미래에 주목받을 수 있는지 살펴보았다.

토픽 분석 결과, Strong signals에는 IoT 기술의 확산 등 에너지 디지털화와 관련있는 마이크로그리드 시스템 및 스마트 홈과 더불어 재생에너지 보급 확산에 따라 주택용 태양광 발전 시스템 및 주택용 배터리가 속했다. 더불어 NILM, 에너지 분할 측정과 같은 에너지 측정과 예측에 관한 토픽이 선정되었다. 이 토픽들은 주로 디지털화와 재생에너지 보급 확산에 관한 토픽이며, 현재 활발하게 연구되고 있는 분야이다.

Weak signals에서는 탄소 중립을 목표로 하는 현재 상황이 흥미롭게 반영된 결과들이 나타났다. 화석에너지 소비 절감 등 청정에너지로의 전환 정책이 광범위하게 추진되고 있다. 가정 에너지 소비 부문에서는 에너지 전반 정책의 최근 흐름과 동일하게 석탄 에너지 소비와 대기오염 물질 배출 관련 논의들이 미래에 주목받을 수 있는 연구 주제로 선정되었다. 또한 기존에 비교적 많은 관심을 받지 않았던 에너지 빈곤, 에너지 성능 평가에 관한 논의도 시간의 변화에 따라 가정 에너지 소비 부문까지 확대되면서 수면위로 올라오고 있다.

다시 요약하자면, Strong signals에는 에너지 기술 혁신과 관련한 주제들이 주를 이뤘다. 최근 10년간 가정 부문 에너지 소비 관련 연구들은 스마트 에너지 기술 및 재생 에너지 기술의 가정 부문 확산과 더불어 이 기술들의 편익에 대해 주로 논의했다고 볼 수 있다. 반면 Weak signals를 검토한 결과, 기술적인 이슈

43) Guillén-Mena and Quesada(2019) 참조.

44) Cozza et al.(2020) 참조.

를 넘어서 탄소중립 정책 추진에 따른 연구 주제들과 에너지 복지, 삶의 질과 관련한 문제가 주요 관심 대상으로 떠오르고 있다는 것을 알 수 있었다. Strong signals와 Weak signals의 종합적인 검토를 통해 기술 혁신을 통한 가정 부문 에너지 효율향상과 더불어, 탄소중립을 달성할 수 있는 에너지 소비 정책 및 제도에 관한 인식과 이에 대한 중요성이 강조되고 있다는 것을 확인했다.

본 연구의 결과를 통해 연구자들은 아직 관심은 적지만 미래에 주목받을 수 있는 Weak signals에 속한 연구들에 관심을 가질 필요가 있으며, 특히 Weak signals에서 파생될 수 있는 연구 주제인 석탄 에너지 수요 및 공급 예측, 주거용 에너지 소비로 인한 대기오염 물질 배출, 에너지 빈곤층의 새로운 기준과 지표, 패시브하우스를 통한 에너지 소비 절감 효과 등에 관심을 기울일 필요가 있다.[45]

정책 입안자들은 청정에너지로의 전환 정책이 시행 중인 가운데, Weak signals에 가정 부문 석탄 소비가 속했다는 것을 참고하여 청정연료로의 교체를 위한 지원 정책 등 석탄 에너지 소비 절감을 위한 정책 수립에 주목할 필요가 있다. 우리나라는 '2050 탄소중립 추진전략(2020.12)'을 통해 석탄발전 비중이 주요국 대비 높은 상황이라고 진단하며, 탄소중립을 위해 화석연료에 대한 의존도를 줄이고, 재생 에너지로의 전환 가속화가 필요하다고 밝혔다.[46] 이처럼 산업 부문의 온실가스 배출 및 석탄 발전 비중을 줄이는 것에 대한 관심이 큰 가운데, 가정 부문의 석탄 소비, 청정연료로의 교체를 위한 지원에도 계속해서 관심을 가질 필요가 있다.

또한 에너지 빈곤층을 위한 에너지 복지 정책에 관한 논의가 앞으로 확장될 가능성이 높다는 것을 고려해야 한다. 우리나라는 에너지 바우처, 저소득층 에너지효율개선사업 등 에너지복지 정책을 통해 에너지 빈곤층의 기본적 에너지 이용권 보장을 위해 노력 중이며 에너지 복지에 관한 토론회와 세미나를 다수 개최하며 정책에 관해 지속적으로 논의 중이다.[47] 현재 에너지 바우처의 경우 소득기준 및 가구원 특성기준을 두고 지원하고 있으며, 지원 대상가구 확대(2019.08) 및 지원대상 확대(2021.07)를 통해 지원 범위를 확대 중이다. 저소득층 에너지효율개선사업 또한 소득기준을 두고, 기초지자체장의 추천을 받은 에너지복지 사각지대의 일반 저소득가구에도 지원하고 있다. 이처럼 지원대상 확대 및 에너지복지 사각지대에 대한 추가적인 지원을 통해 정책의 실효성을 높이고 있는 가운데, 우리나라의 소득 수준 및 에너지 수요의 변화에 대응하여 에너지 빈곤의 정의를 법제화하고, 지원 대상자 범위를 지속적으로 점검하여 실질적인 에너지 빈곤층에 대한 계속적인 지원이 필요하다.

---

45) 다만, 본고는 분석을 위해 Sciencedirect.com에서 학술 논문들의 초록을 수집했기 때문에 전 세계적으로 진행된 연구 주제들을 대상으로 분석했으며, 석탄 소비와 에너지 빈곤 문제는 특정 그룹의 국가들을 대상으로 한 연구들이 많다는 점은 유의하여야 한다.

46) 관계부처 합동(2020), 2050 탄소중립 추진전략 참조.

47) '지속가능한 에너지 복지 체계를 위한 제도 개선방안 정책 세미나(2020.09)', '기후변화시대와 에너지복지 정책과제 토론회(2020.10)' 등이 있음.

참고문헌

국내 문헌

- 관계부처 합동, 2050 탄소중립 추진전략, 2020
- 박기현, 건물에너지 효율 향상을 위한 국제협력 방안 수립 연구, 에너지경제연구원, 2021
- 에너지경제연구원, 에너지통계연보 2021, 2021

외국 문헌

- Aiad, M., & Lee, P. H. (2018). Energy disaggregation of overlapping home appliances consumptions using a cluster splitting approach. Sustainable cities and society, 43, 487-494.
- Ansoff, H. I. (1975). Managing strategic surprise by response to weak signals. California management review, 18(2), 21-33.
- Attia, S., & Carlucci, S. (2015). Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. Energy and Buildings, 102, 117-128.
- Belaïd, F. (2018). Exposure and risk to fuel poverty in France: Examining the extent of the fuel precariousness and its salient determinants. Energy Policy, 114, 189-200.
- Betto, F., Garengo, P., & Lorenzoni, A. (2020). A new measure of Italian hidden energy poverty. Energy policy, 138, 111237.
- Biansoongnern, S., & Plungklang, B. (2016). Non-intrusive appliances load monitoring (nilm) for energy conservation in household with low sampling rate. Procedia Computer Science, 86, 172-175.
- Breschi, V., Piga, D., & Bemporad, A. (2018). Jump model learning and filtering for energy end-use disaggregation. IFAC-PapersOnLine, 51(15), 275-280.
- Chae, S. Y., & Park, J. (2017). A Study of Non-Intrusive Appliance Load Identification Algorithm using Complex Sensor Data Processing Algorithm. The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, 17(2), 199-204.
- Chai, Q., Wang, H., Zhai, Y., & Yang, L. (2020). Using machine learning algorithms to predict occupants' thermal comfort in naturally ventilated residential buildings. Energy and Buildings, 217, 109937.
- Chen, H., Huang, Y., Shen, H., Chen, Y., Ru, M., Chen, Y., ... & Tao, S. (2016). Modeling temporal variations in global residential energy consumption and pollutant emissions. Applied energy, 184, 820-829.
- Chen, J., Wu, Y., Song, M., & Dong, Y. (2018). The residential coal consumption: Disparity in urban–rural China. Resources, Conservation and Recycling, 130, 60-69.
- Cozza, S., Chambers, J., & Patel, M. K. (2020). Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland. Energy Policy, 137, 111085.
- Cristea, C., Cristea, M., Birou, I., & Tîrnovan, R. A. (2020). Economic assessment of grid-connected residential solar photovoltaic systems introduced under Romania's new regulation. Renewable Energy, 162, 13-29.
- da Silva, I. R., de AL Rabêlo, R., Rodrigues, J. J., Solic, P., & Carvalho, A. (2020). A preference-based demand response mechanism for energy management in a microgrid. Journal of Cleaner Production, 255, 120034.
- De Oliveira, G., Jacomino, M., Ha, D. L., & Ploix, S. (2011). Optimal power control for smart homes. IFAC Proceedings Volumes, 44(1), 9579-9586.
- Dinesh, C., Welikala, S., Liyanage, Y., Ekanayake, M. P. B., Godaliyadda, R. I., & Ekanayake, J. (2017). Non-intrusive load monitoring under residential solar power influx. Applied energy, 205, 1068-1080.
- Ellabban, O., & Alassi, A. (2019). Integrated Economic Adoption Model for residential grid-connected photovoltaic systems: An Australian case study. Energy Reports, 5, 310-326.

- Escobar, P., Martínez, E., Saenz-Díez, J. C., Jiménez, E., & Blanco, J. (2020). Profitability of self-consumption solar PV system in Spanish households: A perspective based on European regulations. Renewable Energy, 160, 746-755.
- Essiet, I. O., Sun, Y., & Wang, Z. (2019). Optimized energy consumption model for smart home using improved differential evolution algorithm. Energy, 172, 354-365.
- Fazli, T., & Stephens, B. (2018). Development of a nationally representative set of combined building energy and indoor air quality models for US residences. Building and Environment, 136, 198-212.
- Fernandes, F., Morais, H., Vale, Z., & Ramos, C. (2014). Dynamic load management in a smart home to participate in demand response events. Energy and Buildings, 82, 592-606.
- Fernandes, M. S., Rodrigues, E., Gaspar, A. R., Costa, J. J., & Gomes, Á. (2020). The contribution of ventilation on the energy performance of small residential buildings in the Mediterranean region. Energy, 191, 116577.
- Figueiredo, M., De Almeida, A., & Ribeiro, B. (2012). Home electrical signal disaggregation for non-intrusive load monitoring (NILM) systems. Neurocomputing, 96, 66-73.
- Geng, Y., Chen, W., Liu, Z., Chiu, A. S., Han, W., Liu, Z., ... & Cui, X. (2017). A bibliometric review: Energy consumption and greenhouse gas emissions in the residential sector. Journal of cleaner production, 159, 301-316.
- Giri, S., & Bergés, M. (2015). An energy estimation framework for event-based methods in non-intrusive load monitoring. Energy Conversion and Management, 90, 488-498.
- Guillén-Mena, V., & Quesada, F. (2019). Assessment model of energy performance in housing of Cuenca, Ecuador. Ain Shams Engineering Journal, 10(4), 897-905.
- Houidi, S., Auger, F., Sethom, H. B. A., Fourer, D., & Miègeville, L. (2020). Multivariate event detection methods for non-intrusive load monitoring in smart homes and residential buildings. Energy and Buildings, 208, 109624.
- Jankowiak, C., Zacharopoulos, A., Brandoni, C., Keatley, P., MacArtain, P., & Hewitt, N. (2020). Assessing the benefits of decentralised residential batteries for load peak shaving. Journal of Energy Storage, 32, 101779.
- Karpinska, L., & Śmiech, S. (2020). Invisible energy poverty? Analysing housing costs in Central and Eastern Europe. Energy Research & Social Science, 70, 101670.
- Kerimray, A., Rojas-Solórzano, L., Torkmahalleh, M. A., Hopke, P. K., & Gallachóir, B. P. Ó. (2017). Coal use for residential heating: patterns, health implications and lessons learned. Energy for Sustainable Development, 40, 19-30.
- Khalid, R., Javaid, N., Rahim, M. H., Aslam, S., & Sher, A. (2019). Fuzzy energy management controller and scheduler for smart homes. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 21, 103-118.
- Lin, B., & Wang, Y. (2020). Does energy poverty really exist in China? From the perspective of residential electricity consumption. Energy Policy, 143, 111557.
- Matsui, K., Yamagata, Y., & Nishi, H. (2015). Disaggregation of Electric Appliance's Consumption Using Collected Data by Smart Metering System. Energy Procedia, 75, 2940-2945.
- Middlemiss, L., & Gillard, R. (2015). Fuel poverty from the bottom-up: Characterising household energy vulnerability through the lived experience of the fuel poor. Energy Research & Social Science, 6, 146-154.
- Morsali, R., Thirunavukkarasu, G. S., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A., & Kowalczyk, R. (2020). A relaxed constrained decentralised demand side management system of a community-based residential microgrid with realistic appliance models. Applied Energy, 277, 115626.
- Mudge, L., & Saman, W. (2017). The impact of air conditioning system upgrade on energy use and comfort in low income housing. Energy Procedia, 121, 26-32.
- Park, C., Cho, S., & Heo, W. (2021). Study on the future sign detection in areas of academic interest related to the digitalization of the energy industry. Journal of Cleaner Production, 127801.

- Parra, D., & Patel, M. K. (2019). The nature of combining energy storage applications for residential battery technology. Applied Energy, 239, 1343-1355.
- Paudyal, P., & Ni, Z. (2019). Smart home energy optimization with incentives compensation from inconvenience for shifting electric appliances. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 109, 652-660.
- Pena-Bello, A., Burer, M., Patel, M. K., & Parra, D. (2017). Optimizing PV and grid charging in combined applications to improve the profitability of residential batteries. Journal of Energy Storage, 13, 58-72.
- Peng, L., Zhang, Q., Yao, Z., Mauzerall, D. L., Kang, S., Du, Z., ... & He, K. (2019). Underreported coal in statistics: A survey-based solid fuel consumption and emission inventory for the rural residential sector in China. Applied Energy, 235, 1169-1182.
- Pyka, I., & Wierzchowski, K. (2016). Estimated mercury emissions from coal combustion in the households sector in Poland. Journal of Sustainable Mining, 15(2), 66-72.
- Rashid, H., Singh, P., Stankovic, V., & Stankovic, L. (2019). Can non-intrusive load monitoring be used for identifying an appliance's anomalous behaviour?. Applied energy, 238, 796-805.
- Rodrigues, S., Chen, X., & Morgado-Dias, F. J. E. P. (2017). Economic analysis of photovoltaic systems for the residential market under China's new regulation. Energy Policy, 101, 467-472.
- Sghiouri, H., Mezrhab, A., Karkri, M., & Naji, H. (2018). Shading devices optimization to enhance thermal comfort and energy performance of a residential building in Morocco. Journal of building Engineering, 18, 292-302.
- Sharma, S. V., Han, P., & Sharma, V. K. (2019). Socio-economic determinants of energy poverty amongst Indian households: A case study of Mumbai. Energy Policy, 132, 1184-1190.
- Stopps, H., & Touchie, M. F. (2020). Managing thermal comfort in contemporary high-rise residential buildings: Using smart thermostats and surveys to identify energy efficiency and comfort opportunities. Building and Environment, 173, 106748.
- Yang, S., Chen, B., Wakeel, M., Hayat, T., Alsaedi, A., & Ahmad, B. (2018). PM2. 5 footprint of household energy consumption. Applied Energy, 227, 375-383.
- Zakariazadeh, A., Jadid, S., & Siano, P. (2014). Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 63, 523-533.
- Zhang, D., Evangelisti, S., Lettieri, P., & Papageorgiou, L. G. (2015). Energy consumption scheduling of smart homes with microgrid under multi-objective optimisation. In Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 37, pp. 2441-2446). Elsevier.
- Zhang, X., Chen, B., & Fan, X. (2015). Different fuel types and heating approaches impact on the indoor air quality of rural houses in Northern China. Procedia Engineering, 121, 493-500.

웹사이트

- OECD iLibrary 홈페이지, World energy balances, https://www.oecd-ilibrary.org/energy/data/iea-world-energy-statistics-and-balances/world-energy-balances_data-00512-en?parentId=http%3A%2F%2Finstance.metastore.ingenta.com%2Fcontent%2Fcollection%2Fenestats-data-en